

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR  
ENERGETIKAI ÉS VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZET  
ÁRAMLÁS- ÉS HŐTECHNIKAI GÉPEK INTÉZETI TANSZÉK

## ÚJ TÍPUSÚ AKTÍV TURBULENCIAGENERÁTOROK FEJLESZTÉSE ÉS LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATA

PhD értekezés

KÉSZÍTETTE:

**Szaszák Norbert Tibor**

okleveles energetikai mérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA  
GÉPÉSZETI ALAPTUDOMÁNYOK SZAKTERÜLET  
TRANSPORTFOLYAMATOK ÉS GÉPEIK TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ:

**Prof. Dr. Tisza Miklós**

a műszaki tudományok doktora, egyetemi tanár

TÉMATERÜLET VEZETŐ:

**Prof. Dr. Páczelt István**

akadémikus, a műszaki tudományok doktora, professzor emeritus

TÉMACSOPORT VEZETŐ:

**Prof. Dr. Czibere Tibor**

akadémikus, a műszaki tudományok doktora, rektor emeritus

TÉMAVEZETŐ:

**Prof. Dr. Szabó Szilárd**

egyetemi tanár

Miskolc, 2018

## TARTALOMJEGYZÉK

Eredetiségi nyilatkozat .....	4
Jelölésjegyzék.....	5
Témavezetői ajánlás .....	9
1. Bevezetés.....	11
2. A kutatás előzményei és fő célkitűzései.....	13
2.1. A doktori témám alapjául szolgáló németországi kutatómunka.....	13
2.1.1. A mérési összeállítás .....	15
2.1.2. Az elsődleges vizsgálatok jelentősebb eredményei .....	16
2.1.3. Az eredményekből levont következtetések .....	17
3. Szakirodalmi áttekintés .....	18
3.1. Turbulencia-vizsgálatok az Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszéken....	18
3.2. A turbulencia, mint jelenség.....	18
3.3. A rácsturbulencia.....	19
3.4. Passzív rácsok.....	20
3.5. Aktív rácsok.....	21
4. A rácsturbulenciát leíró főbb fizikai mennyiségek.....	25
4.1. A turbulencia térbeli eloszlását jellemző fontosabb mennyiségek .....	25
4.2. A turbulens kinetikus energia spektrális eloszlása .....	30
5. A laboratóriumi kutatásaim során alkalmazott mérés technikák.....	32
5.1. Hődrótos légsebesség-mérés ( <i>HWA</i> ) .....	32
5.2. Nagysebességű kamerák.....	34
5.3. Hőkamera.....	35
6. Szélcsatornák tervezése és fejlesztése a rácsturbulencia vizsgálatához.....	36
6.1. Új szélcsatorna tervezése és összeállítása.....	36
7. Külső energiaforrást nem igénylő aktív rács összeállítása, áramlástechnikai vizsgálata ..	40
7.1. Poliészter-szalagokból felépített rács összeállítása és vizsgálata .....	40
7.1.1. Passzív és aktív működési mód összehasonlítása .....	41
7.2. Acélszalag-rács összeállítása és vizsgálata.....	43
7.2.1. A fémrács és a feszítőszerkezet összeállítása, szélcsatornába történő beépítése	44
7.2.2. Szisztematikus vizsgálatok elvégzése .....	45
8. Préslevegővel működtetett aktív-rács összeállítása, laboratóriumi vizsgálata.....	57
8.1. Az aktív elemek kinematikájának vizsgálata Magdeburgban .....	57
8.2. Az újabb aktív elemeket tartalmazó aktív rács gyorskamerás vizsgálata a Miskolci Egyetemen .....	64

8.3.	Az aktív elemeket jellemző dimenziótlan paraméterek meghatározása .....	69
8.4.	A légsugár-rács által létrehozott turbulencia vizsgálata .....	72
8.4.1.	A mérési összeállítás .....	72
8.4.2.	A passzív és az aktív rendszer esetén kalkulált áramlási jellemzők összehasonlítása .....	76
8.5.	A légsugár-rács keveredés-intenzifikáló hatásának vizsgálata .....	87
8.5.1.	A mérési összeállítás, az alkalmazott mérési elv .....	88
8.5.2.	A keveréssel kapcsolatos paraméterek bemutatása .....	91
9.	Összefoglalás.....	98
10.	Summary .....	101
11.	Új tudományos eredmények-Tézisek .....	104
12.	New Scientific Results .....	107
13.	Gyakorlati hasznosíthatóság és továbbfejlesztési lehetőségek.....	110
	Köszönetnyilvánítás .....	112
	Az értekezés témájában megjelent saját publikációk .....	113
	A szerző egyéb témákban megjelent publikációi .....	114
	Irodalomjegyzék.....	115
	Ábrajegyzék .....	120
	Táblázatjegyzék.....	122
	Melléletek.....	123

## EREDETISÉGI NYILATKOZAT

Alulírott Szaszák Norbert Tibor büntetőjogi felelősségem tudatában kijelentem, hogy az „Új típusú aktív turbulenciagenerátorok fejlesztése és laboratóriumi vizsgálata” című, a Miskolci Egyetemen működő Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskolába beadott PhD értekezés önálló munkám eredménye, az irodalmi hivatkozások egyértelműek és teljesek.

Kelt: Miskolc, 2018. október 29.

.....  
Szaszák Norbert Tibor  
doktorjelölt

## JELÖLÉSJEGYZÉK

### Latin, nagybetűvel jelölt mennyiségek

<b>Mennyiség jele</b>	<b>A mennyiség leírása</b>	<b>SI mértékegysége</b>
$A_L$	hosszmérték fizikai alammennyiség (Buckingham $\pi$ -elmélet)	m
$A_M$	tömegmérték fizikai mennyiség (Buckingham $\pi$ -elmélet)	kg
$A_T$	időmérték fizikai mennyiség (Buckingham $\pi$ -elmélet)	s
<b>B</b>	az 1-es aktív elem pályagörbéjének koordinátáit tartalmazó adatmátrix	pixel
$C_\varepsilon$	disszipációs konstans	–
$C_a$	aktív elem relatív hossza	–
$C_m$	aktív elem mobilitási száma	–
$C_{res}$	nagysebességű kamerával készített képek fizikai felbontása	pixel/m
$C_t$	aktív elem relatív falvastagsága	–
$D$	rácselem-átmérő/rácselem-vastagság	m
$D^*$	virtuális rácselem-vastagság	m
$D_H$	a szalag-rács vizsgálatokhoz használt szélcsatorna hidraulikai átmérője	m
$E(\kappa)$	teljes energiaspektrum	$m^3s^{-2}$
$E_t$	aktív elem rugalmassági modulusa	Pa
$H$	szélcsatorna mérőterének oldalhossza	m
$L$	alapáramlás irányú integrál hosszlépték	m
$M$	rácsállandó	m
$P$	örvényprodukción	$m^2s^{-3}$
$P_{vill}$	a fűtőegység által felvett villamos teljesítmény	W
$Q_{max,k}$	kompresszor maximális légszállítása	$m^3s^{-1}$
$Q_{max,r}$	rotaméter által maximálisan mérhető térfogatáram (normálállapotban)	$m^3s^{-1}$
$Q_{sec}$	másodlagos (prés)levegő-térfogatáram	$m^3s^{-1}$
$R$	adatpontokra fektetett regressziós görbe korrelációs együtthatója	–
$Re_H$	szélcsatorna-Reynolds-szám	–
$Re_M$	rács-Reynolds-szám	–
$Re_\lambda$	Taylor-Reynolds-szám	–
$T$	integrál időlépték	s
$T_{md,m}$	az $m$ -edik hőterkép hőmérséklet-értékeinek módusza	°C
$T_{norm}$	az adott hőterkép móduszával normalizált hőmérséklet	–
$T_u$	alapáramlás irányú, $u$ -komponensből számított turbulencia-intenzitás	%
$T_{u,l}$	$u$ -komponensből számított, lokális turbulencia-intenzitás	%
$T_v$	$v$ sebességkomponensből számított turbulencia-intenzitás	%

$T_w$	w sebességkomponensből számított turbulencia-intenzitás	%
$U$	időátlagolt sebesség nagyság	ms <sup>-1</sup>
$U_{ref}$	referenciasebesség	ms <sup>-1</sup>
$V_p$	puffertartály-térfogat	m <sup>3</sup>
<b>W</b>	a 2-es aktív elem pályagörbéjének koordinátáit tartalmazó adatmátrix	pixel

Latin, kisbetűvel jelölt mennyiségek

<b>Mennyiség jele</b>	<b>A mennyiség leírása</b>	<b>SI mértékegysége</b>
$b_1-b_6$	fizikai mennyiség jelölése mátrixban és egyenletrendszer felírásakor	–
$d_{i,t}$	aktív elem belső átmérője	m
$e_1$	hosszmérték fizikai mennyiség mértékegységében szereplő hatványkitevője	–
$e_2$	tömegmérték fizikai mennyiség mértékegységében szereplő hatványkitevője	–
$e_3$	időmérték fizikai mennyiség mértékegységében szereplő hatványkitevője	–
$f$	frekvencia	Hz
$f_s$	mintavételi frekvencia	Hz
$f_{sz}$	szalagok rezgési frekvenciája	Hz
$i$	izotrópia-arány	–
$i_m$	átlagos izotrópia-arány	–
$i_{sd}$	az adott mérési vonalban kapott izotrópia-értékek szórása	–
$k$	fajlagos turbulens kinetikus energia	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
$l^*$	aktív elem tömegközéppontjának a csatlakozási ponttól mért távolsága	m
$l_{a,t}$	aktív elem aktív(szabadon mozgó) hossza	m
$m_{ex}$	aktív elem végére helyezett extra tömeg értéke	kg
$\dot{m}_{pr}$	a légsugaras rácstra a szélcsatorna konfúzorából érkező levegő tömegárama	kg s <sup>-1</sup>
$\dot{m}_{sec}$	a légsugaras rácstól aktív esetben megtápláló préslevegő tömegárama	kg s <sup>-1</sup>
$\dot{m}_{tot}$	a légsugaras rácstól követő mérőterben mért tömegáram	kg s <sup>-1</sup>
$n$	regressziós hatványgörbe hatványkitevője	–
$n_k$	kompresszor percenkénti fordulatszáma	min <sup>-1</sup>
$p_{g,max,k}$	a kompresszor által előállított maximális nyomáskülönbség	Pa
$r$	két vizsgált pályagörbe közötti kétdimenziós korrelációs együttható értéke	–
$r_u(\tau)$	$u$ sebességkomponens idősorának normalizált autokorrelációs függvénye	–
$\bar{u}$	$x$ irányú pontbeli, időátlagolt sebességkomponens	ms <sup>-1</sup>

$u'$	alapáramlás irányú ( $x$ ) sebesség-ingadozás	$\text{ms}^{-1}$
$u_{sd}$	alapáramlás irányú sebességkomponens szórása	$\text{ms}^{-1}$
$u_\eta$	Kolmogorov-sebességlépték	$\text{ms}^{-1}$
$\bar{v}$	$y$ irányú pontbeli, időátlagolt sebességkomponens	$\text{ms}^{-1}$
$v'$	alapáramlásra merőleges, vízszintes irányú ( $y$ ) sebesség- ingadozás	$\text{ms}^{-1}$
$v_{sd}$	vízszintes irányú ( $y$ ) sebességkomponens szórása	$\text{ms}^{-1}$
$\bar{w}$	$z$ irányú pontbeli, időátlagolt sebességkomponens	$\text{ms}^{-1}$
$w'$	alapáramlásra merőleges, függőleges irányú ( $z$ ) sebesség- ingadozás	$\text{ms}^{-1}$
$w_{sd}$	függőleges irányú ( $z$ ) sebességkomponens szórása	$\text{ms}^{-1}$
$w_t$	aktív elem falvastagsága	m
$x$	a rácstól mért csatorna-hossztengely irányú távolság	m
$y_{cs}$	csővég vízszintes ( $y$ ) pozíciója	pixel
$z_{cs}$	csővég függőleges ( $z$ ) pozíciója	pixel

#### Görög betűvel jelölt mennyiségek

<b>Mennyiség jele</b>	<b>A mennyiség leírása</b>	<b>SI mértékegysége</b>
$\nu$	kinematikai viszkozitási tényező	$\text{m}^2\text{s}^{-1}$
$\mu$	dinamikai viszkozitási tényező	Pa·s
$\Delta t_k$	képkészítés során az egy-egy kép készítése között eltelt idő	s
$\varepsilon$	turbulens kinetikus energia disszipációs ráta	$\text{m}^2\text{s}^{-3}$
$\eta$	Kolmogorov-hosszlépték	m
$\kappa$	hullámszám	$\text{m}^{-1}$
$\kappa_H$	a mérőtér jellemző méretéből számított hullámszám	$\text{m}^{-1}$
$\lambda_g$	Taylor-mikrolépték	m
$\rho_t$	aktív elem anyagának sűrűsége	$\text{kgm}^{-3}$
$\sigma$	kitöltési tényező /solidity ratio/	–
$\tau_0$	autokorrelációs függvény nullátmenetéhez tartozó abszcissza	s
$\tau_\eta$	Kolmogorov-időlépték	s
$\varphi$	tömegáram-viszony a légsugaras rács aktív állapotában	–

## Rövidítések

<i>A/D</i>	analóg-digitális
<i>AC</i>	váltakozó áram (Alternating Current)
<i>CCA</i>	állandó áramú légsebességmérő technika (Constant Current Anemometry)
<i>CCD</i>	töltéscsatolt eszköz (Charge-Coupled Device)
<i>CMOS</i>	komplementer fémoxid félvezető (Complementary Metal-Oxide Semiconductor)
<i>CTA</i>	állandó hőmérsékletű légsebességmérő technika (Constant Temperature Anemometry)
<i>HWA</i>	hődrótos légsebességmérő technika (Hot Wire Anemometry)
<i>Nd-YAG</i>	neodímium-ittrium- alumínium-germánium (lézer)
<i>PIV</i>	részecskeképeken alapuló sebességmérő technika (Particle Image Velocimetry)
<i>psd</i>	teljesítménysűrűség-spektrum (Power Spectral Density)
<i>r.m.s.</i>	négyzetes középérték (root-mean-square)
<i>R-G-B</i>	vörös-zöld-kék színtkomponensek (Red-Green-Blue)
<i>sd</i>	szórás (standard deviation)



## TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS

**Szaszák Norbert**

„Új típusú aktív turbulenciagenerátorok fejlesztése és laboratóriumi vizsgálata”  
című Ph.D. értekezéséhez

Szaszák Norbert középiskolai évei alatt villamosipari képzésben részesült, s ezt követően egyetemi tanulmányait a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Energetikai Mérnök Szakán folytatta, mert e képzés keretében – többek között – fontos szerep jut a villamos energetikának is. Mind a BSc., mind pedig az MSc. szintű tanulmányait e szakon végezte az előbbi a Gépészeti, utóbbit pedig az Épületenergetika Szakirányon.

Egyetemi tanulmányait kiemelkedő szorgalommal és aktivitással végezte. E tudatos felkészülés keretében kötelező tanulmányain túl

- Erasmus ösztöndíjjal öt hónapos külföldi részképzésen vett részt Svédországban a Lulea University of Technology-n;
- részt vett az Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke aktuális ipari projektjeiben;
- MSc. diplomamunkáját a Magdeburgi "Otto von Guericke" Egyetemen készítette el, a vonatkozó dolgozata angol nyelvű: "Experimental characterization of a cost-effective active grid for turbulence generation." E téma lett későbbi kutatási tevékenységének alapja.

Mindeközben kiemelkedő tanulmányi munkájának jutalmául egyetemi (Tanulmányi emlékérem különböző fokozatai (3-szor), Köztársasági ösztöndíj), városi (Miskolc Város Ösztöndíjasa (2-szer)) és ipari (A Termoment Kft. kiváló szakdolgozat díj, Bosch-díj) elismerésekben is részesült.

További tevékenysége tekintetében meghatározó volt a magdeburgi diplomamunka elkészítése. Egyrészt érdeklődése a tudományos munka irányába fordult, másrészt olyan témával is megismerkedett, amely számára érdekes és továbbfejlesztésre érdemesnek ígérkezett. Ezért jelentkezett és nyert felvételt a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskolájába 2012-ben. Doktori képzése és az azt követő kutatómunka idején is igazolta a korábbi tanulmányai alatt tanúsított elhivatottságát és kitartását. Doktori tanulmányai során, majd 2015-től oktatói munkája mellett magas szintű kutatásokat folytatott a turbulenciagenerátorok fejlesztése tématerületen. Jelentős közreműködésével – speciálisan az aktív turbulenciagenerátorokra épülő – DAAD német-magyar kutatócsere pályázat került kidolgozásra, amely 2014-2015. időszakban segítette az intenzív nemzetközi kutatómunkát. Ennek keretein belül több alkalommal is hosszabb időt töltött Magdeburgban, ahol a témával kapcsolatos fejlesztési, mérési és kiértékelési feladatokat végzett.

Munkájának magas szintű teljesítését segítették az utóbbi években általa elnyert tehetséggondozó pályázatok: Apáczai Csere János Doktoranduszhallgatói ösztöndíj (12 hónap), Nemzeti Tehetség Program keretében az „Egyedi fejlesztést biztosító ösztöndíjak NTP-EFÖ-P-15” elnevezésű ösztöndíj.

Szaszák Norbert olyan mérnök-kutató alkat, aki a mérések területén kiválóan alkalmas kutató munkára. A mérések megtervezését, valamint a berendezések megépítését is részben önállóan, részben irányításával a szakszemélyzet végzi. A mérések végrehajtásában és kiértékelésében alapos, körültekintő, precíz. A korszerű, bonyolult mérőberendezések kezelését hamar elsajátítja. A mérések kiértékelése nem okoz számára gondot, szükség esetén a vonatkozó kiértékelő szoftvereket önállóan elsajátítja és sikerrel alkalmazza. Biztos angol nyelvismeretének birtokában a vonatkozó szakirodalmat kellő alaposággal tanulmányozza és dolgozza fel.

Doktori munkája keretében sikerrel alkalmazta a fenti készségeit. A tématerület – az aktív turbulenciagenerátorok – megismerését követően nagymérvű tudatossággal készült a vállalt feladat kidolgozására. Kiemelendő, hogy jelentős feladatot vállalt a mérésihez szükséges feltételek megteremtésében is (pl. szélcsatornát fejlesztett, légellátó berendezést épített ki). A rendelkezésére álló méréstechnikákat alkotó módon, nem egyszer újszerű módon alkalmazta (pl. gyorskamera alkalmazása mozgó elemek korrelációjának vizsgálatához, termokamera alkalmazása gázkeveredés-vizsgálatokhoz). A mérések adatainak feldolgozásához jelentős feldolgozó modulokat készített *MATLAB* környezetben. Az általa vizsgált két turbulenciagenerátor közül a szalag-rács teljes mértékben saját ötlete és kivitelezése. A légsugaras rács esetében is jelentős fejlesztő munkát végzett a megfelelő geometriai és anyagtulajdonságokkal rendelkező mozgó elemek kiválasztásakor.

Mindkét rács tekintetében az általuk létrehozott turbulencia jellemzőinek szabályozása és a turbulencia jellemzőinek mérése tekintetében szisztematikus vizsgálatokat tervezett és hajtott végre. A nemzetközi szakirodalomban fellelhető értékelési módszerek többségét alkalmazta. A mérési adatait, azok különböző geometriai és fizikai jellemzőktől való függését a szakirodalomban ismerttetett más típusú generátorok hatásával összevetette. Tudományos eredményeit alaposan bizonyított tézisekben foglalta össze.

Összefoglalóan bizton állíthatjuk, hogy Szaszák Norbert kutató munkája eredményeképpen gazdagabb lett a vonatkozó nemzetközi szakmai közösség két – hatásában jól dokumentált – új típusú turbulenciagenerátorral.

A jelölt dolgozata a sokéves kitaró munka kellően átfogó, de mégis tömör összefoglalása.

A dolgozatot jó szívvel ajánlom minden szakmabeli olvasónak és külön a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola figyelmébe.

Miskolc-Egyetemváros, 2018. október 22.

Prof. Dr. Szabó Szilárd

# 1. BEVEZETÉS

Doktori kutatómunkám alapjául a diplomatervem szolgált. 2011-ben a magdeburgi "Otto von Guericke" Egyetemen (a továbbiakban: Magdeburgi Egyetem) végeztem laboratóriumi vizsgálatokat egy új típusú turbulenciát generáló aktív rács fejlesztéséhez kapcsolódóan. Mivel igen érdekesnek találtam ezt a témát, továbbá a fejlesztési lehetőségek új tudományos eredmények elérésének lehetőségét vetítették előre, ezért e témával 2012-ben jelentkeztem, majd felvételt nyertem a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karán működő Sályi István Gépészeti tudományok Doktori Iskolába.

Témavezetőmmel definiáltuk a doktori kutatómunka várható irányvonalát, szisztematikus mérőföldköveit, s később ezek mentén igyekeztem felépíteni és elvégezni a kutatásomat. A diplomamunkám készítése során ismerkedtem meg a turbulencia generálásához szükséges rácsok szakirodalmával, amely a doktori kutatásom megkezdéséhez hasznos információkkal szolgált. A kutatásom fő irányvonala így olyan újszerű, turbulenciát generáló rácsok fejlesztése lett, amelyekkel számos, laboratóriumi szélcsatornában elvégezhető áramlástechnikai mérésekhez szükséges, adott turbulens jellemzőkkel bíró alapáramlás hozható létre. Fontos szempont volt még a kialakítandó rács felépítésének a jelenlegi megoldásokhoz viszonyított egyszerűsége és olcsósága. A jelenleg elterjedten alkalmazott ún. aktív rácsok ugyanis igen bonyolult felépítésűek, s vezérlésükhöz összetett apparátus szükséges.

A turbulens áramlás (e helyen csak igen tömören jellemezve) olyan áramlást jelöl, ahol az áramló közeg fizikai jellemzői – vizsgálataimnál elsődlegesen a pillanatnyi sebességkomponensek – térben és időben is igen gyorsan, kaotikusan változnak. A való világban végbemenő áramlásos folyamatok döntő hányada turbulens jellegű, tehát áramlástechnikai szempontból igen fontos a turbulenciával foglalkozni. Ezzel szemben a szélcsatornában, azok mérési terében létrehozott áramlások jellemzően igen alacsony turbulenciájúak, tehát az áramlási tér adott pontjában a sebességkomponensek időszora igen kis szórást mutat. Viszont számos olyan áramlástechnikai vizsgálat, mérés létezik, amelyeknél fontos a megfelelően magas turbulenciájú alapáramlás biztosítása, hiszen ennek megléte esetén biztosítható a vizsgálandó test valós, a természetben is előforduló körülményekhez hasonló viselkedése. Példaként megemlíthető a repülőgépszárny, egy szélturbina lapátja, vagy még inkább egy ventilátor, amelyek működésük közben jellemzően igen nagy turbulenciájú áramlásnak vannak kitéve (a ventilátor esetén a periodikus járókerék-állórész kölcsönhatás miatt akár 20%-os turbulencia intenzitás is kialakulhat), így egyértelmű, hogy a laboratóriumi vizsgálatok is – a hasonlósági törvények alapján – megfelelő turbulens paraméterekkel rendelkező áramlást követelnek meg. Ahhoz, hogy szélcsatornában ilyen körülményeket teremthessünk, elsődlegesen turbulenciát generáló rácsot, vagy más néven turbulenciagenerátort alkalmazhatunk. Ezeknek két típusát különböztethetjük meg aszerint, hogy tartalmazznak-e mozgó elemeket, vagy sem: amennyiben a rács nem rendelkezik mozgó elemekkel, s nem is növeli meg az áramló közeg átlagos lendületét, úgy azt passzívnak nevezzük, ellenkező esetben aktív rácsról beszélünk. Az aktív rácsokkal jellemzően magasabb fokú, s szélesebb spektrumú turbulencia hozható létre a passzív társaikhoz képest, azonban ezek jóval összetettebb, s ilyen módon jelentősen drágább szerkezetek. A dolgozatom későbbi részeiben részletesen bemutatom a különböző típusú rácsokat.

A doktori kutatómunkám keretein belül két, különböző működési elvet alkalmazó aktív rácsot fejlesztettem és vizsgáltam. A munkám fő irányvonalát a már említett, a diplomamunkámhoz köthető kisminta-prototípus alapján összeállított nagyméretű,

szélcsatornába beépített turbulenciagenerátor, s az általa megváltoztatott áramlás vizsgálata jelentette. E rács esetében ahhoz, hogy az alapáramlás turbulenciáját minél nagyobb mértékben növelni tudjuk, annak rácspontjaiban elhelyezett, mozgó rugalmas csövecskéken keresztül az alapáramláshoz másodlagosan bejuttatott préslevegőt alkalmaztunk. Ezzel a megoldással nem csupán az áramlási térben mozgó aktív elemeket tudunk létrehozni, hanem a csövecskékből időben folyamatosan változó irányban nagysebességű légsugarakat is juttatunk az alapáramlásba. Ezek együttes hatásaként a rendszertől nagymértékű turbulencia-növekedés várható.

Ezen irányvonal mellett saját elgondolásom alapján egy olyan aktív rács fejlesztésével is foglalkoztam, amely felépítéséből adódóan működéséhez nem igényel külső energiaforrást. Ez a megoldás egy rugalmas fémszalagokból álló rács, amely a szélcsatornában beállított alapáramlás nyomási energiájának (azaz a meghajtó-ventilátor által a levegőnek átadott energiának) egy részét felhasználva rezgésbe jön, így hozva létre intenzívebb turbulenciát. E típusú rács későbbi felhasználását tekintve az ipar területén is hasznosítható lehet, hiszen például többfázisú áramlás esetén (portartalmú gáz) a létrejövő turbulens keveredés megakadályozhatja a szállított por kiülepedését, porcsóva kialakulását, amely adott esetben kopáshoz, korrózióhoz vezethet.

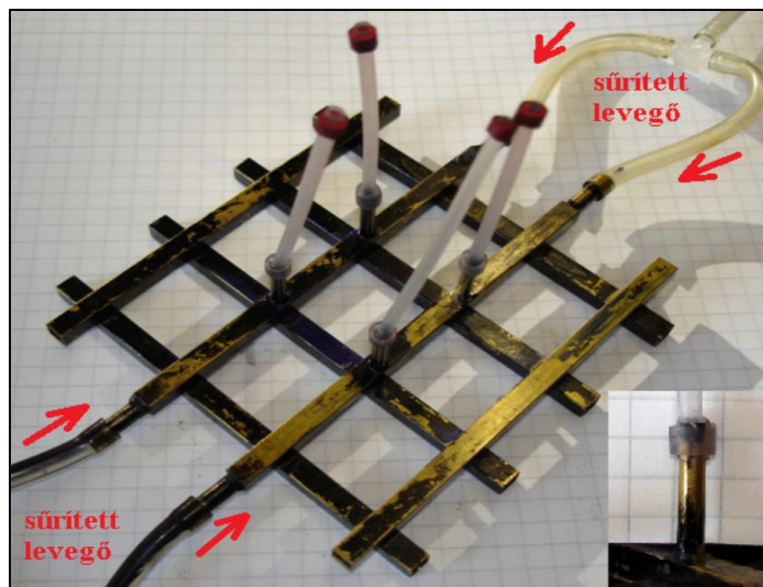
A rácsok vizsgálatát mind a Miskolci Egyetem, mind pedig a Magdeburgi Egyetem áramlástechnikai laboratóriumában, különböző mérés technikák felhasználásával végeztem el. Mindkét rács aktív elemeinek mozgását nagysebességű kamera segítségével is vizsgáltam, jellemeztem. Mindkét típus esetén, – szakirodalmi ajánlásokat figyelembe véve – a vizsgált turbulens áramlásokhoz talán a legalkalmasabb mérés technikát, a hődrótos sebességmérést (*HWA*: Hot Wire Anemometry) alkalmaztam. E mérés technika segítségével jellemezhettem a kialakult áramlás turbulencia-paramétereit, továbbá a kapott eredményeket összehasonlíthattam a szakirodalmi adatokkal.

## 2. A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI ÉS FŐ CÉLKITŰZÉSEI

E fejezetben belül röviden összefoglalom a doktori kutatásom alapjául szolgáló, azt megelőző témareleváns kutatómunkámat, s annak eredményeit. E munkámból készítettem 2012-ben megvédett diplomaterveimet is.

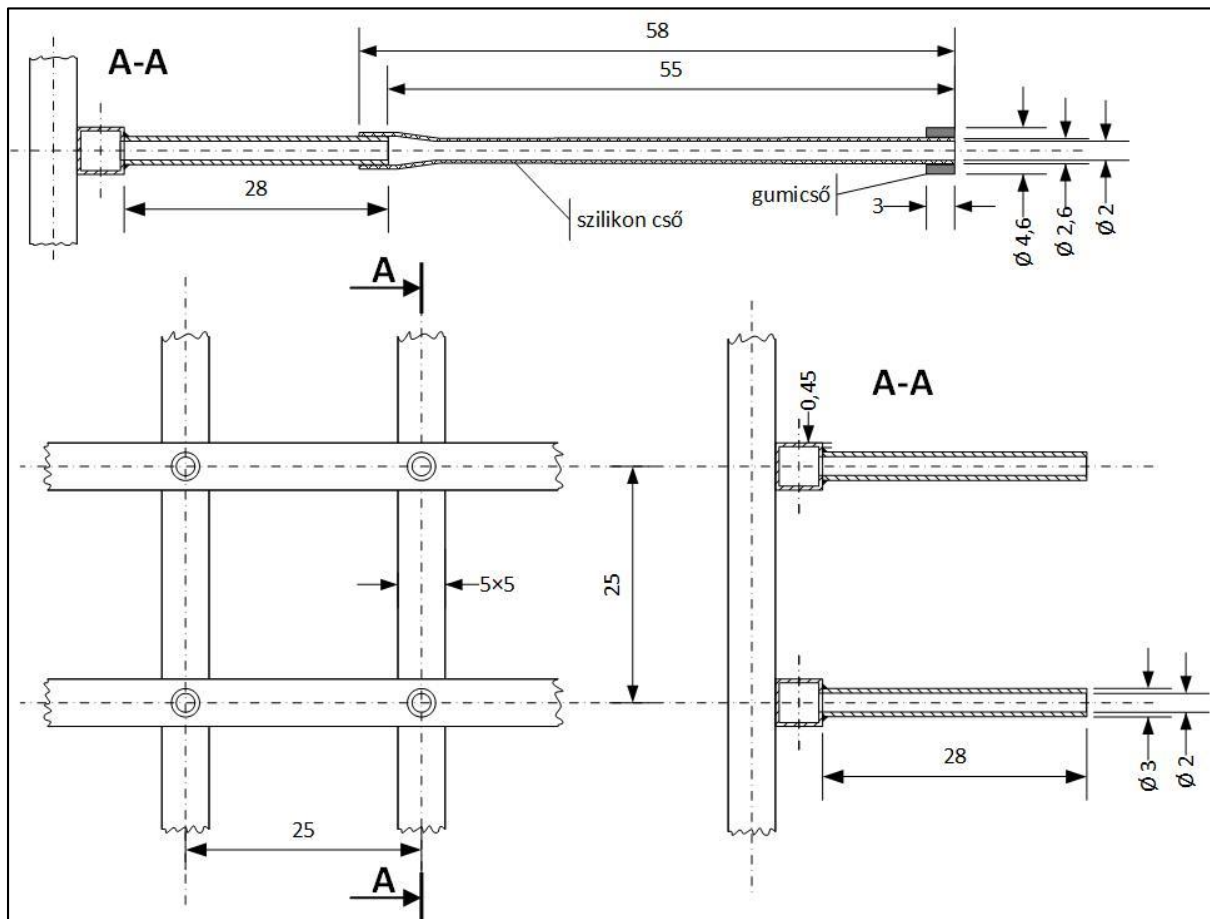
### 2.1. A doktori témám alapjául szolgáló németországi kutatómunka

Doktori kutatómunkám alapjául a Magdeburgban készített mesterfokozatú diplomamunkám (Szaszák, 2012) és az annak eredményeit összefoglaló konferenciacikkem (Szaszák et al., 2012a) szolgált, amelyek témája egy új típusú, turbulenciát generáló rács fejlesztése és laboratóriumi vizsgálata volt 2011. nyarán. A Magdeburgi Egyetemen akkoriban folyó kutatásokhoz a légköri turbulenciához hasonló jellegű szélcsatorna-áramlás létrehozása volt a cél. Ennek jellemzője a kis áramlási átlagsebességhez tartozó relatíve magas fokú turbulencia-intenzitás (Bordás et al., 2013). Ilyen áramlás létrehozásához elsőként egy passzív rácsot kombináltak a szélcsatorna-ventilátor gyors fordulatszám-változtatásával. Azonban ez a megoldás a későbbi kísérletekhez elfogadhatatlanul nagy időléptékeket hozott létre az áramlásban (Bordás et al., 2011). Ezért döntöttek egy aktív típusú rács fejlesztése mellett. A rács fejlesztését tehát több ok is indokolta. Ezek közül a legfontosabbak: annak felépítéséből és működési elvéből adódó relatíve alacsony költsége, továbbá az előzetesen feltételezett, vele létrehozható magas fokú turbulencia lehetősége, amelyet a majdani mérésekhez megfelelően kis időléptékek jellemeznek. A vizsgálataimhoz egy kisméretű, csupán 4×4 darab, négyzet keresztmetszetű üreges fémrúdból álló kétsíkú rácsot alkalmaztam, amely az 1. ábrán látható. Az így létrejött 16 metszéspont közül a belső négyen a rács síkjára merőleges irányban furatok készültek, majd ezekhez a furatokhoz apró fémcső-csonkok lettek rögzítve. Ezekhez a csonkokhoz csatlakoztattuk a rács aktív elemeiként működő rugalmas szilikon csövecskéket.



1. ábra A levegőmegtáplálással ellátott prototípus-rács a rajta elhelyezett rugalmas csövecskékkel (a szabad végükön extra súlyokkal).

Miként az az 1. ábrán is látható, két belső, felül elhelyezett rácselemen kör keresztmetszetű toldatok kerültek elhelyezésre, amelyekhez a levegőmegtáplálást lehetett csatlakoztatni. A rács egy elemének műszaki rajzát a fontosabb méretek feltüntetésével a 2. ábra szemlélteti.

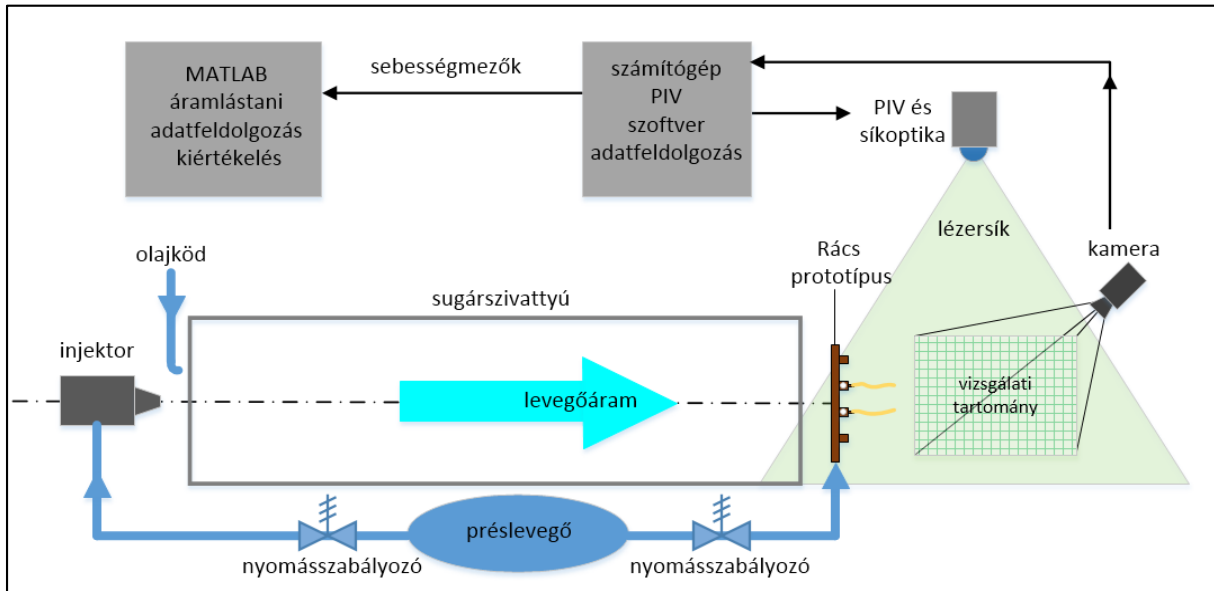


2. ábra A prototípus-rács egy elemének műszaki rajza a fontosabb méretekkel.

A rács aktív állapotában tehát préslevegőt juttattam a rugalmas csövecskékbe, amelyekre a kiáramló levegő erővel hatott, így azok ennek megfelelően mozgásba jöttek. A mozgó csövekből kiáramló levegősugár iránya folyamatosan változó volt, így a csőre ható erő is folyamatosan változott. Ennek eredményeként egy nagy sebességű, szabad szemmel nem követhető „csapkodó” mozgás jött létre. Az egymáshoz közel elhelyezett csövecskék mozgásuk közben gyakran ütköztek egymással, így feltételezésem szerint az egyes csövek mozgása sztochasztikus jellegű. Ennek vizsgálatára a doktori kutatásaim keretében szintén kitértem. A diplomamunkám során elsőként azt határoztam meg, hogy milyen aktív-elem variációval lehet a leghatékonyabban növelni az alapáramlás turbulenciáját. Ehhez különböző hosszúságú, falvastagságú és anyagtulajdonságú csöveket, s esetenként ezek kombinációit vizsgáltam. Továbbá a megvizsgált, összesen 9 különböző eset közül a legígéretesebb csővariáció kiválasztása után arra kerestem a választ, hogy az adott prototípus aktív üzemben miként módosítja az alapáramlás turbulenciáját. Ehhez egy sugárszivattyú elven üzemelő légszűrőt állítottam össze, majd a csatorna kifúvó keresztmetszetének közelében rögzítettem a prototípust. A rács utáni áramlás vizsgálatához részecskekép-alapú mérés technikát, azaz *PIV* technikát alkalmaztam.

### 2.1.1. A mérési összeállítás

A rács vizsgálatához összeállított rendszert a 3. ábra szemlélteti. Mind az alapáramlást, mind pedig a rács aktiválását préslevegővel megtáplált nyomáscsökkentő szelepekkel oldottam meg. Az áramlástani jellemzőket a ráctól való távolság függvényében kívántam meghatározni, így a mérési teret is ennek megfelelően állítottam be.



3. ábra A kezdeti vizsgálatokhoz használt rendszer felépítése.

A sugárszivattyúval előállított alapáramlás a kör keresztmetszetű áramlási csatornát követően keresztülhaladt a rácson. Az áramlás irányából nézve a rácst követően, az áramlással párhuzamos síkot vizsgáltam. Ehhez egy speciális *PIV* kamerát alkalmaztam (főbb adatait az **M1** melléklet tartalmazza), amelyet a vizsgált síkra jó közelítéssel merőlegesen ( $\pm 5^\circ$ ) helyeztem el, és a mérőprogramba beépített trapéz-korrekcióval korrigáltam a kapott képeket. Az alkalmazott *PIV* sebességmérési technika az áramlásba juttatott apró részecskék (esetemben ködgenerátorral előállított olajköd-részecskék) pillanatnyi helyzetét rögzítő, igen rövid időn belül ( $50 \mu\text{s}$ ) elkészített,  $108 \mu\text{m}/\text{pixel}$  képfelbontású képpár alapján, azok keresztkorrelációval meghatározott elmozdulás-vektorain alapul. E vektorokból a kapcsolódó szoftver alkalmazásával megkaphatjuk a pillanatnyi sebesség-vektor teret. Ahhoz, hogy csak a vizsgált síkban érzékelhesse a kamera a részecskéket, a kamerával szinkronizált, impulzusüzemű *Nd-YAG* lézerrel előállított síkban történik a megvilágítás. Az alkalmazott lézer főbb adatait az **M2** melléklet tartalmazza.

Egy mérési sorozat (500 db képpár)  $\sim 83$  másodperc alatt került rögzítésre. Az adatokat ezt követően a *PIV* szoftverével dolgoztam fel. Ismerve az egy-egy kép felvétele között eltelt időt ( $50 \mu\text{s}$ ), az elmozdulás-mezőből számíthatóvá vált a sebességmező is. Mivel a turbulens áramlásra jellemző az időben igen gyors változás, ezért egy-egy mérési sorozathoz nagyszámú sebességmezőt határoztam meg. Ezeket aztán a *MATLAB* nevű programban az erre a célra általam készített programsorral dolgoztam fel majd értékeltem ki, így megkapva számos áramlástechnikai jellemzőt.

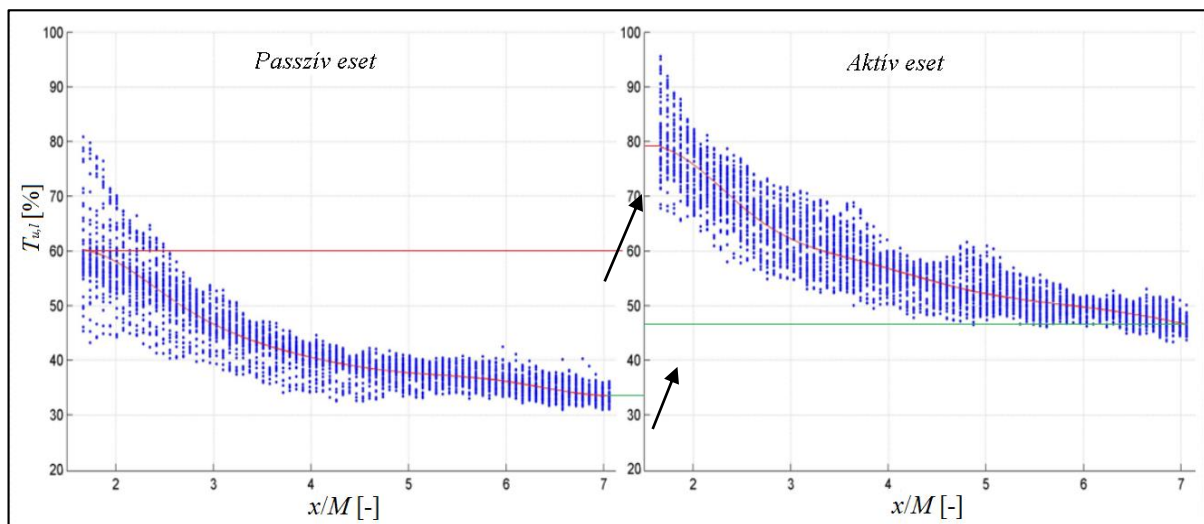
## 2.1.2. Az elsődleges vizsgálatok jelentősebb eredményei

Az adatmezők kiértékelését a rács után, a rácsállandóval ( $M=25$  mm) dimenzióatlanított vízszintes távolság ( $x/M$ ) függvényében, az  $x/M=\{1,6\div 7,2\}$  intervallumban tettem meg, függőleges ( $z$ ) irányban 4  $z/M$  tartományban átlagolva a megfelelő értékeket. A vizsgálatok elsődleges célja tehát az volt, hogy megbizonyosodjak a rács aktiválásának a turbulenciára gyakorolt hatásáról. Ezen okból számos, a turbulenciát jellemző mennyiséget határoztam meg, de ezek közül e munkámban csupán az alapáramlás-irányú, lokális turbulencia-fok ( $T_{u,l}$ ) és a (fajlagos) turbulens kinetikus energia ( $k$ ) alakulását mutatom be mind passzív (a csövekben nincs áramlás), mind pedig aktív (a csövekben is van légbevezetés) esetben.

Az alapáramlás irányú lokális turbulencia-fok ( $T_{u,l}$ ) nem más, mint az adott pontban mért hosszirányú sebességkomponens-idősor ( $u$ ) szórásának ( $u_{sd}$ ) (Kundu & Cohen, 2002) és az ott mért átlagsebességnek ( $\bar{u}$ ) az aránya:

$$T_{u,l} = \frac{u_{sd}}{\bar{u}}. \quad (2.1)$$

Ez az arányszám jellemző a turbulencia erősségére, s ennek százalékos kifejezése látható méréseim alapján a 4. ábrán, a rács passzív (bal oldal) és aktív állapotában (jobb oldal).



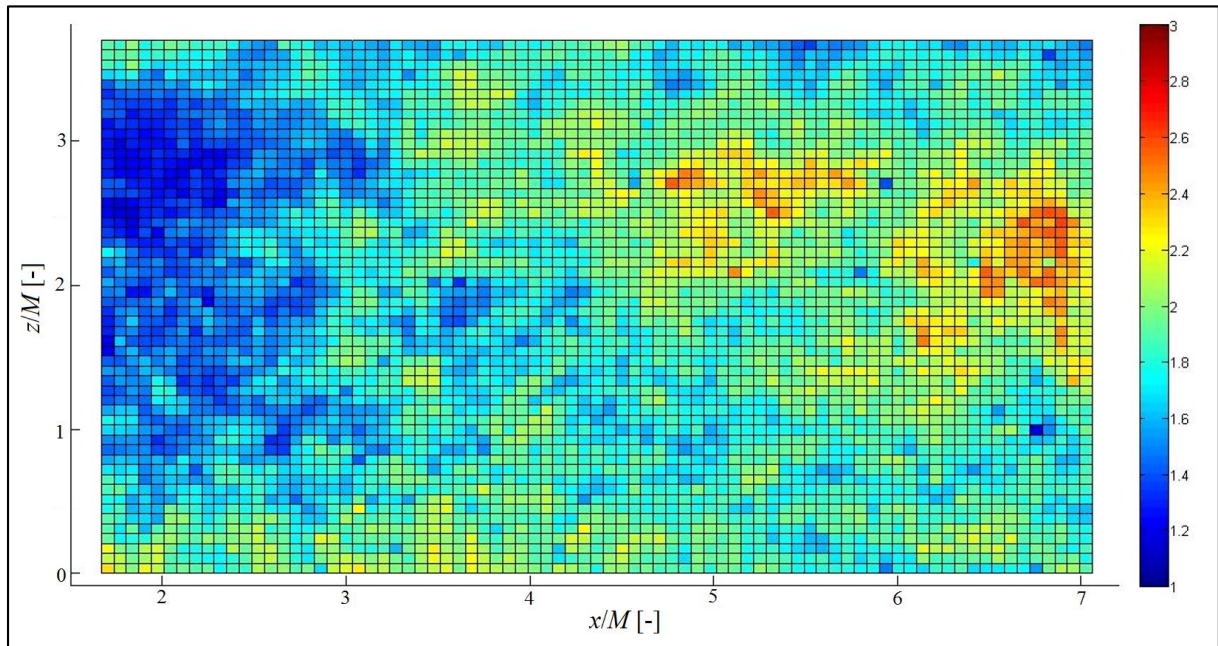
4. ábra A lokális turbulencia-fok alakulása a rács után passzív és aktív esetben. A piros görbék a rácstól adott távolságban, függőleges ( $z$ ) irányban kiátlagolt adatokat kötik össze. (Szaszák 2012).

Az ábrán megfigyelhető, hogy a rács aktív állapota esetén a vizsgált térrészben jelentősen, a távolságtól függően nőtt a turbulencia-fok, tehát az eszköz alkalmas a turbulencia fokozására. Látható az is, hogy mindkét esetben monoton csökkenő a turbulencia-fok, aminek magyarázata az, hogy a rácstól bizonyos távolságon túl már nem beszélhetünk örvény-produkcióról, az áramlásban lévő turbulens örvények egyre kisebbekre esnek szét, majd a disszipáció miatt folyamatosan elhalnak. Ennek okán a rács-turbulenciát elhaló turbulenciának is nevezik.

A fajlagos turbulens kinetikus energia ( $k$ ) egy olyan energia típusú mennyiség, amely a sebességkomponensek szórásnégyzeteiből ( $u_{sd}$ ,  $v_{sd}$ ,  $w_{sd}$ ) számítható, ilyen módon a turbulencia erősségére, energiataralmára jellemző (lásd 4.11 összefüggés). Az 5. ábra az aktív és a passzív mérési esetben kiszámolt turbulens kinetikus energia-értékek arányát mutatja a vizsgált



síkrészben ( $v_{sd} \approx w_{sd}$  feltételezésével), jó közelítéssel megegyező áramlási átlagsebességek esetén.



5. ábra A turbulens kinetikus energia-értékek aránya ( $k_a/k_p$ ) a vizsgálat síkrészben (Szaszák, 2012).

Az 5. ábra alapján belátható, hogy a teljes vizsgálati intervallumban növekedett a turbulens kinetikus energia a rács aktiválásakor, tehát az arányszám mindenhol egyes érték feletti. Továbbá fontos észre venni azt is, hogy a ráctól távolodva ez az arányszám egyre növekszik, azaz távolabb nagyobb mértékű növekedés érhető el a rács aktiválásával. E megállapítást a doktori kutatómunkámban is vizsgáltam, s további mérési eredményeim is igazolták ezt.

### 2.1.3. Az eredményekből levont következtetések

Az előzőleg bemutatott, a diplomamunkámból kiemelt eredmények alapján tehát megállapítható az, hogy a kifejlesztett prototípus-rács aktív állapotában alkalmas a turbulencia további fokozására, tehát ilyen módon az érdemes további fejlesztésre, vizsgálatokra. Továbbá azt találtam, hogy a rács aktiválása számos egyéb, olyan mennyiséget is előnyösen változtatott meg (pl. Kolmogorov-hosszlépték, energiaspektrum, izotrópia-arány, disszipációs-ráta, stb.), amelyek alapján érdemesnek tartottam – doktori munka keretében - tovább foglalkozni a rács áramlástechnikai vizsgálatával.

### 3. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A következőkben a kutatómunkámmal kapcsolatos szakirodalmat mutatom be. A turbulencián, mint jelenségen belül az úgynevezett rácsturbulenciát részletekbe menően ismertetem – külön kitérve az általam vizsgálthoz hasonló légsugaras rácsokra –, s bemutatok a turbulencia jellemzésére használt több olyan mennyiséget, amelyeket a laboratóriumi vizsgálataim segítségével határozhattam meg. Ilyen módon számos irányból tudtam összehasonlítani a vizsgált rács által létrehozott turbulens áramlás jellemzőit más, a témában megjelent szakirodalmi eredményekkel.

#### 3.1. Turbulencia-vizsgálatok az Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszéken

A Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszékén a turbulenciával kapcsolatos kutatások több évtizedes múltra nyúlnak vissza. E kutatásokat megalapozandó Prof. Dr. Czibere Tibor egy új turbulencia-modellt dolgozott ki, amely modellel kapcsolatban számos jelentős tudományos munka készült (Czibere et al. 1999a,b; Czibere et al. 2001), továbbá ehhez kapcsolódóan doktori értekezések is születtek (Janiga, 2002; Könözy, 2004). Az egyes turbulencia-modellekben szereplő modell-konstansok meghatározása gyakran empirikus úton, laboratóriumi mérések segítségével történik, ezért az elméleti modellek megalkotása mellett fontos feladat a szükséges áramlástechnikai mérések elvégzése is. Mivel az általam fejlesztett turbulenciageneráló rácsok után kialakuló turbulens áramlás alkalmas az egyes modell-konstansok laboratóriumi vizsgálatára, ezért az elvégzett kutatómunkám szervesen illeszkedik a vonatkozó elméleti turbulenciamodellel fejlesztésekhez is.

#### 3.2. A turbulencia, mint jelenség

A turbulenciát, mint jelenséget már sokan próbálták egzaktul megfogalmazni, de ez idáig - ismereteim szerint - még nem elfogadott a témában jártas kutatók által egyöntetűen elfogadott definíciója. Tsinober (2001) munkájában összefoglalta a különböző kutatók által használt, a turbulenciára vonatkozó definíciókat. A legtöbb megfogalmazás eléggé pontatlan, mint például a Schlichting & Kestin (1960) által megfogalmazás, miszerint (saját fordításban) a turbulens áramlások: „olyan mozgások, amelyekben szabálytalan ingadozás (keverés vagy örvénylő mozgás) figyelhető meg a fő áramlási irányra nézve”. Bayly et al. (1988) szerint olyan áramlás, ahol „a folyadékmozgás komplex és szabálytalan karakterisztikájú”. Az egyik legtömörebb megfogalmazás (Saffman, 1981) szerint a turbulencia nem más, mint „véletlenszerű kaotikus örvények” sokasága. Sajnos ez a megfogalmazás is ellentmondásos, mivel a szavak, hogy „véletlenszerű” és „kaotikus” azt sejtetik, hogy egy matematikai megoldás, amely feltétlenül determinisztikus, nem létezik. Talán a legpontosabb, s egyben tömör megfogalmazás a turbulenciára nézve az az, amit Bradshaw (2013) fogalmazott meg: „A Navier-Stokes egyenlet általános megoldása”. Egy másik leírás Tuoc (2009)-tól származik, amely megfogalmazás saját fordításban a következőképp hangzik: „egy olyan, fő keresztáramlással bíró rendszer, amelyben a keresztáramlás másodlagos váltakozó áramlást tartalmaz, s ez valamilyen szöveget zár be a főáramlás irányával, továbbá kölcsönhatásban is áll vele” (angolul: „a system with a main cross flow containing secondary intermittent streaming, at some angle to the direction of the main flow and with which it interacts”). Ezen megfogalmazások alapján belátható továbbá, hogy turbulens áramlás esetén az áramló közeg keveredése (ezzel együtt az anyag- és

energiatranszportja) lényegesen nagyobb mértékű, mint ahogy az várható lenne pusztán a molekuláris diffúzió alapján; tehát a turbulencia diffúzív tulajdonságú. Ennek első kísérleti bemutatása Reynolds, Osborne (1883) nevéhez fűződik, aki igen szemléletesen mutatta be a turbulencia keveredésre gyakorolt hatását. Éppen ezért magával a turbulenciával igen széles körben foglalkoznak annak gyakorlati alkalmazhatósága miatt is: pl. turbulens hőátadási tényező, áramlási ellenállás vizsgálata, stb. Ahogy azt az előbbiekből láthattuk is, a turbulencia jelensége igen széleskörű érdeklődésnek örvend, azonban a különböző nézetek s magyarázatok miatt igen óvatosan kell kezelni annak leírását, megfogalmazását.

Lesieur (2008) szerint maga a turbulencia egy igen veszélyes téma, amely számos komoly vitát vált ki tudományos üléseken. Napjainkban igencsak leegyszerűsítve három, alapjaiban eltérő látásmódot különböztethetünk meg a turbulencia jelenségének vizsgálata szempontjából. Az első a statisztikai leírásmód, amely az átlagolt áramlástan jellemzők alakulásának modellezésén keresztül próbálja meg leírni a jelenséget. Ennek úttörői voltak Kolmogorov (1890) és Taylor (1938a, 1938b) is, akik erősen vitatták annak lehetőségét, hogy bármiféle koherencia vagy rend lenne jelen a turbulenciában. Ezzel szemben helyezkedik el a „koherencia a káosz között” felfogásmód (Saffman, 1981) amely tisztán determinisztikus szemszögből írja le a turbulenciát a dinamikai rendszer vagy az áramlás stabilitásának vizsgálatával. Ebbe a csoportba tartoznak többek között a kísérleti kutatók és a számítógépes szimulációkat készítő szakemberek. A harmadik irányzatot a fizikusok képviselik többek között a renormálási csoport-módszerrel (Yakhot & Orszag, 1986), a multifraktalitással, és a Lagrange-i megközelítéssel.

A turbulens áramlás feltétele a megfelelően nagy értékű Reynolds szám (Lohász & Réger, 2010). Mivel turbulens áramlás csakis sűrűlódásos folyadék ( $\mu > 0$ ) esetén jöhet létre, ezért az disszipatív, tehát az áramlásban jelen lévő deformációsebesség hatására a sűrűlódó folyadék mozgási energiája folyamatosan hővé alakul, így zárt rendszer esetén, külső energiabevitel hiányában a rendszer idővel nyugalomba kerül. Hasonló a helyzet akkor is, amikor a turbulenciát kiváltó ok térben rögzített (pl. örvényleválást okozó test, esetemben maga a rács), azonban az áramlás magával sodorja a testről levált örvényeket. Ekkor az örvények az idővel (vagyis a megtett úttal) együtt folyamatosan náluknál kisebb örvényekre esnek szét, amíg végül a jellemző méretük a Kolmogorov-hosszlépték ( $\eta$ ) értékének környezetéig csökken, s a kicsiny örvények disszipálódnak, elhalnak.

### 3.3. A rácsturbulencia

Kutatásaim során mivel kifejezetten a turbulenciát generáló rács után kialakult turbulencia vizsgálatával foglalkoztam, így fontos megismerni a rácsturbulenciára vonatkozó összefüggéseket, jellemzőket.

A legtöbb áramlástechnikai berendezésben az áramlás minőségének javítása érdekében alkalmaznak az áramlás útjába beépített rácsot/rácsokat (Laws & Livesey, 1978; Pennycuik, et al., 1997), azonban ezeket kifejezetten turbulencia generálására is alkalmazhatjuk abban az esetben, amikor a rács jellemző méretét (pl. átmérőjét) figyelembe vevő Reynolds szám megfelelően nagy értékű (Kurian & Fransson, 2009.). Az ilyen esetekben beszélhetünk tehát a klasszikus rácsturbulenciáról, amely – jellemzői alapján – a turbulencia elméletek és modellek tesztelésére kifejezetten alkalmas.

Általánosságban, abban az esetben mondhatjuk, hogy egy – akár – turbulens áramlás homogén, amennyiben az átlagolt (áramlástechnikai) mennyiségek irány szerinti megváltozásai

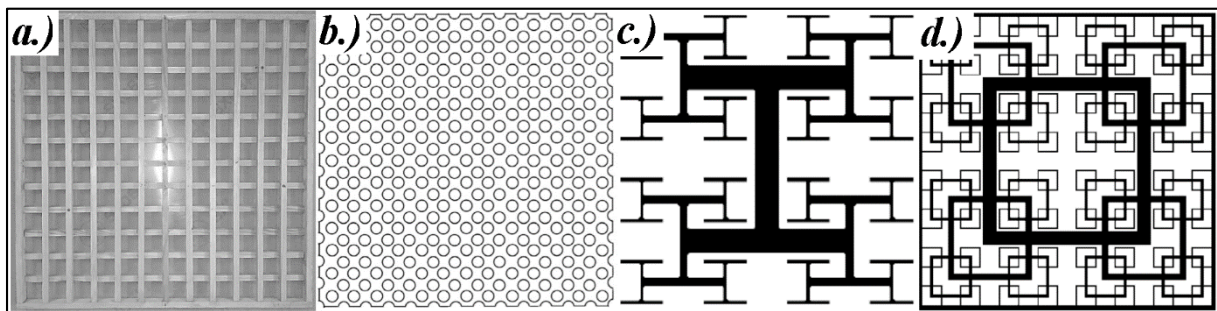
zérusok, azaz térben állandó értékűek. Térben állandósult átlagsebesség esetén (ilyenkor nincsen turbulens örvény-produkció) a homogén turbulencia elhal a belső súrlódásos folyamatok miatt. Mivel a rácson átáramló levegő esetén a rács maga sebességváltozást hoz létre közvetlenül önmaga után (Davidson, 2014), így annak közelében semmiképp sem beszélhetünk homogén turbulenciáról. Azonban a rács után megfelelően nagy távolságtól (a vonatkozó szakirodalom szerint ez legalább  $10 M$  távolság (Roach, 1987; Djenidi & Tardu, 2012; Djenidi, Tardi & Antonia, 2013)) vizsgálva a létrehozott rács-turbulencia jó közelítéssel homogén, elhaló turbulenciaként kezelhető (Pope, 2000). Ennek oka az, hogy a szélcsatornában létrehozott áramlás statisztikailag stacionárius, továbbá a csatorna belső térrészében (távol annak falaitól) ez a statisztika egyedül a középvonal ( $x$  tengely) függvényében változik. Abban az esetben, ha az áramlás átlagsebességével ( $U$ ) együttmozgó koordináta-rendszerből vizsgálódunk, a turbulencia bizonyos megkötésekkel tehát homogénnek tekinthető, amely az idővel együtt ( $t=x/U$ ) fejlődik ki (majd hal el a disszipáció következményeként). Fontos kritérium még a turbulencia homogenitása szempontjából az is, hogy a szélcsatorna szélességének és a rácshosszának az aránya legalább  $W/M \geq 10$  legyen (Roach, 1987). Emellett az alkalmazott rács  $\sigma$  kitöltési tényezőjére (a rács által kitakart és a teljes, rácsot magában foglaló keresztmetszet aránya, 8.1 összefüggés) a  $\sigma \ll 0,5$  reláció kell, hogy fennálljon (Villermaux et al., 1991). Az előzőekben felsorolt kritériumok mindegyikének eleget tettem az általam végzett vizsgálatok alatt mindkét típusú rács vizsgálata esetén.

Amennyiben rács-turbulenciát kívánunk előállítani, abban az esetben tehát mindenképpen szükséges alapáramlást létrehozni (pl. szélcsatornában), s az alapáramlásra merőleges síkban olyan testet/szerkezetet kell elhelyeznünk, amely megfelel az előzőekben említett kritériumoknak. Alapvetően a rács-turbulencia létrehozásához a már előzőekben is említett kétfajta rácsot alkalmazhatunk: passzív vagy aktív rácsokat. Az adott típuson belüli al típusokat a következőkben mutatom be.

### 3.4. Passzív rácsook

A passzív rácsook minden esetben olyan szerkezeti megoldások a rács-turbulencia létrehozásához, amelyek nem tartalmaznak mozgó elemet, továbbá nem is adnak az alapáramlásnak extra impulzust (pl. másodlagos légsugarak bejuttatásával). Annak ellenére, hogy a passzív rácsook nem tartalmaznak mozgó elemeket, a rács-elemekről történő örvény-leválások helyzete időben változik, így ilyen megközelítésből akár aktív rácsooknak is nevezhetnénk ezeket (Gad-el-Hak & Corrsin, 1974). Az egyértelműség kedvéért – továbbá a szakirodalom túlnyomó többsége alapján – az ilyen rácsokat mégis passzív rácsokként fogom kezelni. Valószínűsíthetően elsőként Simmons & Salter, 1934-es publikációja volt az első passzív rács által keltett turbulenciával foglalkozó szakirodalom. Ezekkel a rácsokkal jellemzően csupán kismértékben növelhető az áramlás turbulencia-intenzitása, továbbá a kialakuló turbulencia jellemző hosszleptékei is csak bizonyos tartományon belül alakulhatnak (Comte-Bellot, 1971). Ettől függetlenül a passzív rácsook keltette rács-turbulencia vizsgálata nélkülözhetetlen volt a különböző turbulencia-elméletek fejlődéséhez, a turbulencia modellezéséhez, továbbá validációk esetén a megfelelő peremfeltételek meghatározásához (Sakai et al., 2001). Ilyen rácsoknál a rácshossz ( $M$ ) és a rácsvastagság/rácshatár ( $D$ ) módosításával (megtartva a homogenitáshoz szükséges arányokat (Roach, 1987), továbbá közel állandó kitöltési tényezőjű rácso készítve) különböző jellemző hosszleptékű turbulencia hozható létre közel állandó értékű turbulencia-intenzitás mellett (Kurian & Fransson, 2009). A

hagyományos típusok egy vagy két síkban egymáshoz illesztett vízszintes és függőleges irányú, hengeres (Uberoi, 1963) vagy szögletes keresztmetszetű rudakból készült rácsokból tevődtek össze (6a ábra), esetleg perforált lemezből álltak (6b. ábra). Mindeközben az utóbbi évtizedekben a kutatások jellemzően a fraktálrácsokra helyeződtek át (6c ábra; 6d ábra), amelyek mindegyike ún. önhasznó alakzatokat tartalmazó mintájú rács. Az ilyen rácsok által létrehozott turbulencia jellemzői sok esetben eltérést mutatnak a hagyományos rácsok esetében kapottaktól, így érthető a téma iránti kiemelt érdeklődés (Discetti et al., 2013; Hurst & Vassilicos, 2007; Zhou et al., 2014). Például az 6d ábrán látható fraktálráccsal adott esetben magasabb értékű Taylor-Reynolds szám ( $Re_\lambda$ ) kapható, azaz jobban kialakult, tehát a turbulencia energiaspektrumán szélesebb tehetetlenségi tartománnyal bíró turbulencia kelthető, mint egy nagyobb  $\sigma$  kitöltési tényezőjű, s így nagyobb nyomásesésű klasszikus ráccsal.



6. ábra Hagyományos és önhasznó mintázatú passzív rácsok. a.) kétsíkú, négyzetes rudakból álló rács (Podráczki, 2015); b.) kör alakú perforációval ellátott lemezlap (Ahmadi-B. et al., 2015; Liu et al., 2007); c.) I-mintázatú önhasznó rács (Discetti et al., 2013); d.) négyzetes fraktálrács (Laizet & Vassilicos, 2013).

Mivel elméletileg minden passzív rács esetén közös tulajdonság az, hogy egy adott beépítés esetén a létrehozott turbulenciát csupán az alapáramlás sebessége és a rács tulajdonságai határozzák meg, így nyilvánvaló, hogy egy adott ráccsal csupán csak limitált határok között változtathatók a turbulencia jellemzői. E megkötést oldják fel az aktív rácsok alkalmazásával, amelyek esetén valamilyen – a rács működési elvére jellemző – módszerrel megváltoztatható a létrehozott turbulencia több fontosabb paramétere is.

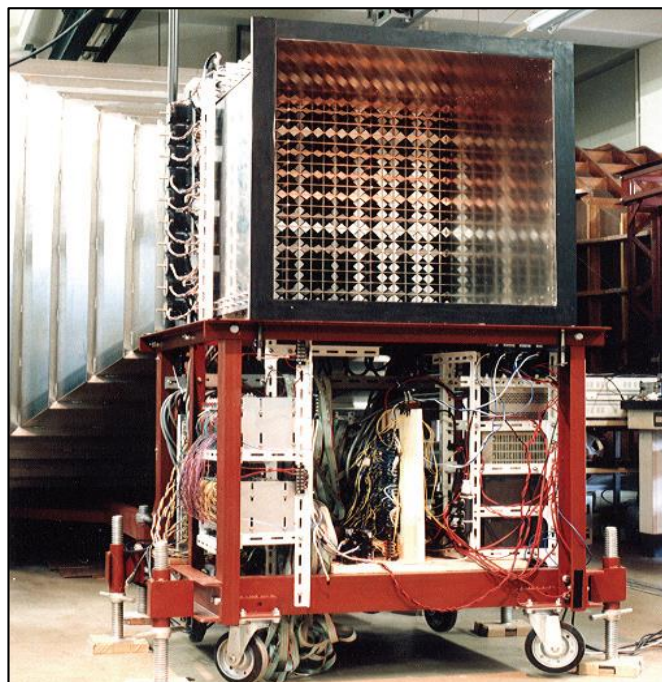
### 3.5. Aktív rácsok

Az aktív rácsok tehát lényegében attól különböznek a passzív társaiktól, hogy esetükben időben aktívan változtatható a rács lokális kitöltési-tényezőjének ( $\sigma$ ) eloszlása, vagy más esetekben az alapáramlásba juttatott nagysebességű légsugarakkal, esetleg mozgó elemekkel megváltoztatható az áramló közeg lokális, pillanatnyi impulzusa. Mindezek hatására jelentős mértékű (nagy intenzitású) turbulencia hozható létre igen széles intervallumban mozgó hosszléptékkal.

A legelső, mozgatható rácselemeken alapuló aktív rács szakirodalomban történő leírása valószínűsíthetően Ling & Wan (1972) nevéhez fűződik, ahol is függőleges tengelyekre szerelt téglalap alakú elemeket mozgattak úgy, hogy az egymás melletti tengelyek éppen ellenkező irányban tértek ki, maximálisan  $\pm 19^\circ$ -kal. Két évvel később, ehhez hasonló felépítésű, vibráló rácsot készítettek és vizsgált Sato & Saito (1974) is. Ozono munkatársaival egy  $9 \times 11$  darab axiális ventilátorból álló rácsot épített majd vizsgált, amelyeket egyedileg tudtak vezérelni szervomotorokkal, s az általuk létrehozott légáramot különálló csöveken keresztül vezették a

szélsatornába (Ozono et al., 2006, Ozono et al., 2007). Thompson & Turner (1975) oszcilláló rácsot alkalmazott a turbulens keveredés, továbbá az oszcillálás paramétereinek a turbulenciára gyakorolt hatásának vizsgálatához. De Silva & Fernando (1994) függőleges irányban oszcilláló, horizontális síkban, víz alatt elhelyezett egysíkú rácsot alkalmazott a turbulencia előállításához. Ezzel a megoldással egy átlagsebesség nélküli, azonban közel izotrópnak tekinthető turbulenciát sikerült létrehozniuk. Doktori kutatómunkám alatt többek között e tanulmányok alapján jött az az ötletem – a légsugaras típusú mellett – a szintén általam fejlesztett rezgőszalagos turbulenciagenerátor megtervezéséhez, megépítéséhez, majd vizsgálatához (Szaszák, 2013; Szaszák & Szabó, 2013b; Szaszák & Szabó, 2014a,b; Szaszák & Szabó, 2015a,b; Szaszák et al., 2016, Szaszák et al., 2017a,b,c,d). Erről a rácsról, s a segítségével előállítható turbulenciáról a későbbiekben részletesen be fogok számolni.

Az előzőekben felsorolt típusoktól eltérően a napjainkban legelterjedtebb megoldás Makita & Miyamoto (1983) publikációjához kapcsolható, habár a szakma szélesebb rétegeihez csupán közel nyolc évvel később jutott el az a forradalmian újszerű koncepció (Makita, 1991; Makita & Sassa, 1991). A megoldás újszerűsége tehát abban rejlett, hogy segítségével viszonylag kisméretű (tehát számos áramlástechnikai laboratóriumban rendelkezésre álló) szélsatornában is jelentős intenzitású turbulencia állítható elő. Így érthető módon az eredeti eszköz alapján sok aktív rácsot készítettek el világszerte: Larssen & Devenport, 2002; Boquillion et al., 2003; Kang et al., 2003; Cekli & Water, 2010a; Fischer et al., 2016. Talán a Makita-féle generátor legnagyobb méretű megvalósítása Larssen & Devenport (2011) nevéhez fűződik, akik a rács számos vizsgált működési módja esetén egy átfogó, alapos leírást adtak az előállított turbulencia jellemzőiről. Ezek mellett olyan aktív turbulenciagenerátorok is megjelentek, amelyek egyesítették a passzív fraktál-rácsok és a Makita-féle aktív rács előnyeit (Thormann & Meneveau, 2014). A Makita-féle elképzelés lényegében olyan vízszintes és függőlegesen elhelyezett, időben változtatható fordulatszámú forgást végző tengelyekből álló rácsot jelentett, amely rácselemeken a tengellyel párhuzamos átlójú, négyzet alakú szárnylapátok lettek elhelyezve. Ennek kialakítása a 7. ábrán látható.



7. ábra Makita-típusú aktív turbulenciagenerátor (Makita & Sekishita, 2006).

A rácsot felépítő tengelyek mindegyikét egy egyedileg vezérelhető szervomotor hajtotta meg, amelyek működtetéséhez így egy igen nagy kapacitású számítástechnikai apparátus is szükséges volt (a 7. ábrán a generátor alatti térben). Mindezek okán – habár igen sok szakirodalmi eredmény alapján jelentős turbulencia hozható létre segítségével – a rács rendkívüli összetettsége miatt annak összeállítása s működtetése kifejezetten költséges.

Az aktív turbulenciagenerátorok egy másik, részletekbe menően vizsgált típusa légsugarakat alkalmaz a turbulencia növeléséhez, ezek az úgynevezett légsugár-rácsok. Ezek a megoldások nem tartalmazzak mozgó elemeket, azonban valamilyen módon (pl. a rácspontokból, vagy a csatorna falából) fűvókákon keresztül az alapáramlással párhuzamosan (azzal szemben vagy megegyező irányban), esetleg arra merőlegesen belövellt másodlagos légsugarak zavarják meg az áramlást. Az egyik legelső publikáció ebben a témában Mathieu & Alcaraz (1965) nevéhez fűződik, ahogy arról Gad-el-Hak & Corrsin (1974) beszámolt légsugaras-rács témájú munkájában. Kísérletéhez ilyen megoldásokat alkalmazott többek között Guillon, 1968; Charnay, 1969; Thole et al., 1994; Shavit & Chigier, 1995; továbbá Aufderheide et al., 2014 is. Teunissen (1969) légsugár-rácsát olyan módon építette meg, hogy annak segítségével tetszőleges átlagsebességű alapáramlás turbulenciáját tudta vizsgálni. Luxenberg & Wiskind (1969) a légsugaras rács után kialakuló turbulens áramlás minőségét vizsgálta, mivel az ilyen típusú rácsokkal jellemzően inhomogén áramlási tér jött létre. A légsugaras rácsokkal kapcsolatos néhány, a szakirodalomban közzétett inhomogenitás-értéket mutat be a 3.1 Táblázat, amely alapján látható, hogy ennek értéke egyes esetekben igen jelentősen eltért az ideálistól, ami az ilyen típusú aktív rácsok hátrányaként említhető.

3.1 Táblázat: Légsugaras rács után kialakuló áramlási tér inhomogenitása

Szakirodalom	a rács kitöltési tényezője ( $\sigma$ [-])	légsugár/ alapáramlás [%]	átlagsebesség-profil inhomogenitása [%]
Guillon (1968)	0,51	4,4	n.a.
Mathieu & Alcaraz (1965)	n.a.	n.a.	15
Teunissen (1969)	n.a.	n.a.	15
Luxenberg & Wiskind (1969)	0,44	0–4,33	30
Liu et al. (1971)	0,44	0–5,64	10

Éppen ezért számos erőfeszítést tettek az áramlás homogenitásának növelése érdekében többek között Hwang & Eaton, 2004; Fransson et al., 2005; Goepfert et al., 2010. Azonban a legmeghatározóbb eszköz talán Gad-el-Hak & Corrsin (1974) nevéhez fűződik, akik egy egyszerű, csövekből álló passzív rácsot – annak rácspontjaiban – láttak el egyenként beállítható erősségű légsugarakat az alapáramlásba juttató fűvókákkal. Ezzel az ötlettel egészen magas (a passzív rácsokét megközelítő) homogenitású áramlást tudtak létrehozni: 5%-os inhomogenitásról számoltak be az alapáramlással szemben elhelyezett fűvókák működtetése esetén. Méréseik során az alapáramlás térfogatáramához viszonyított légsugár-aránya 0÷8,55% között alakult, s főbb eredményeiket a 3.2 Táblázat tartalmazza (az egyes mennyiségek definícióit lásd a 4. fejezetben).

3.2 Táblázat: Gad-el-Hak & Corrsin (1974) légsugaras-rács eredményei 8,55%-os légsugár-alapáramlás térfogatáram-arány esetén

$\sigma$ [-]	$U_{ref}$ [m/s]	$M$ [mm]	$x/M$ [-]	$Re_M$ [-]	$Tu$ [%]	$i$ [-]	$\eta$ [mm]	$Re_\lambda$ [-]
0,37	4,2	102	46	41800	3,27	1,11	0,39	160

Az ő munkájukat követve Tassa & Kamotani, 1974; Fransson & Alfredsson, 2003; Yoshioka et al., 2004; Fransson et al., 2005 is hasonló módon állítottak elő turbulenciát vizsgálataikhoz. Egy további, ezekhez hasonló elven működő típusú rácsot vizsgált Variano et al. (2004), amely munkát Mydlarski & Warhaft (1996) és Hwang & Eaton (2004) tanulmányai inspirálták: egy tartályban véletlenszerűen, rövid ideig létrehozott légsugarakat alkalmaztak a turbulencia intenzifikálásához.

Ezek alapján tehát látható, hogy a 2. fejezetben röviden bemutatott, Magdeburgban összeállított, majd a prototípus alapján továbbfejlesztett rács az előzőekben részletezett passzív és aktív rácsoktól annyiban tér el, hogy nem csupán fix irányú (egymással párhuzamos) légsugarakat juttat az alapáramlásba, hanem azok irányát folyamatosan, – a méréseim alapján sztochasztikusan – változtatja. E sugarak tehát folyamatosan kölcsönhatásban vannak egymással és az alapáramlással is, így e megoldás a szakirodalomban fellelt, légsugaras generátorok továbbfejlesztésének is tekinthető.



## 4. A RÁCSTURBULENCIÁT LEÍRÓ FŐBB FIZIKAI MENNYISÉGEK

Ahhoz, hogy a rácsok által keltett turbulenciát jellemezhesük, azt számos aspektusból meg kell vizsgálnunk. Turbulencia esetén az áramlási tér valamely adott, fix pontjában az áramlási sebesség időben folyamatosan változik. Ennek oka az, hogy az áramlás átlagsebességével különböző méretű örvények haladnak keresztül a vizsgált ponton, amelyeknek maguknak is különböző sebességgel mozognak/forognak, továbbá e mozgásuk közben folyamatosan kisebb és kisebb örvényekre esnek szét. Így tehát egy adott pontban vizsgálva az áramlást, egy időben igen gyorsan változó pillanatnyi sebesség függvényt kapunk. Ilyen idősort laboratóriumban legegyszerűbben úgynevezett hődrótos légsebességmérő-technika (*HWA*) alkalmazásával kaphatunk. Ezen idősből aztán különböző matematikai műveletekkel igen számos, a turbulenciát az áramlási tér adott pontjában jellemző fizikai mennyiséget kaphatunk. Emellett egy másik megközelítés a turbulencia minőségének az áramlási térben való eloszlását hivatott megadni. Ekkor az áramlási tér egy adott térrészében (pl. kitüntetett tengelyén vagy síkjában) történő pillanatnyi sebességek mérése szükséges (akár egy adott időpillanatban a teljes vizsgálati térben, például *PIV* technikával; vagy statisztikailag stacionernek (azaz időtől független) tekinthető áramlás esetén időben eltolt mérések segítségével), s a kapott idősből számíthatók a turbulencia térbeli eloszlására jellemző mennyiségek.

### 4.1. A turbulencia térbeli eloszlását jellemző fontosabb mennyiségek

Miként azt már ismertettem, a rács-turbulencia esetén az áramlás átlagsebességének gradiense nulla kell, hogy legyen, mivel csak ebben az esetben tekinthetünk el az örvénytermelésről ( $P$ ), amely az elhaló turbulencia feltétele. Ez a feltétel – jó közelítéssel – azonban a csatorna mérőszakaszának csupán a belső, a falaktól és a rácsától is messze eső térrészében teljesül, s annak a térrésznek is a rácsától mérve legalább  $10M$  távolságától. Ebben a térbeli tartományban tehát az áramlás időátlagolt, pontbeli sebességének ( $\bar{u}$ ) közel állandónak kell lennie abban az esetben, ha az áramlást magát statisztikailag stacionernek tekintjük. Ilyenkor a kialakult turbulencia jó közelítéssel homogénnek tekinthető, ebben a térrészben az egyes jellemzők elméletileg csupán a mérőszakasz középvonalának mentén változnak, azaz a rácsától való távolság ( $x$ ) függvényei. Ezek alapján tehát a turbulencia homogenitását jellemezhetjük a pontbeli, időátlagolt sebességértékek alakulásával: a vizsgált térrészben ezek szóródása minél kisebb értékű, annál homogénebb turbulenciáról beszélhetünk. A szakirodalomban ennek külön mérőszáma nincs, jellemzésére a vizsgált térrészben, a ráccsal párhuzamos síkban kalkulált  $\bar{u}/U_{ref}$  értékek terjedelmét használják ( $U_{ref}$  az alkalmazott referencia-átlagsebesség).

Mivel a rács-turbulenciának – bizonyos közelítéssel – fontos tulajdonsága az izotrópia, ezért ennek vizsgálata szintén fontos ahhoz, hogy az effajta turbulenciára jellemző mennyiségekhez alkalmazható (egyszerűsített) összefüggések valós eredményeket szolgáltatassanak. Izotróp turbulencia esetén nem ismerhető fel preferált térbeli irány a turbulencia jellemzői esetén, tehát a mennyiségek függetlenek az irányultságtól. Talán a legegyszerűbb összefüggés a turbulencia irányfüggetlenségének eldöntéséhez nem más, mint az adott pontban az egyes sebességkomponens idősorokból kalkulált szórások ( $u_{sd}$ ,  $v_{sd}$ ,  $w_{sd}$ ) egymáshoz viszonyított arányainak vizsgálata. A sebességkomponens szórása nem más, mint a mért sebességkomponens-idősorokból ( $u(t)$ ,  $v(t)$ ,  $w(t)$ ) számított sebességkomponens fluktuációk

$(u'(t), v'(t), w'(t))$  idősorából nyert négyzetes közép (r.m.s) értéke (Kundu & Cohen, 2002). Az egyes sebességkomponensek fluktuációi a 4.1-4.3 összefüggésekkel számíthatók:

$$u'(t) = u(t) - \bar{u}, \quad (4.1)$$

$$v'(t) = v(t) - \bar{v}, \quad (4.2)$$

$$w'(t) = w(t) - \bar{w}. \quad (4.3)$$

A fluktuáció-idősorok négyzetes közép (r.m.s.) értékei, azaz a sebesség-idősorok szórásai a 4.4-4.7 összefüggésekkel számolhatók:

$$u_{sd} = u'_{rms} = \sqrt{(u'(t))^2} = \sqrt{(u(t) - \bar{u})^2}, \quad (4.4)$$

$$v_{sd} = v'_{rms} = \sqrt{(v'(t))^2} = \sqrt{(v(t) - \bar{v})^2}, \quad (4.5)$$

$$w_{sd} = w'_{rms} = \sqrt{(w'(t))^2} = \sqrt{(w(t) - \bar{w})^2}. \quad (4.6)$$

A rács jellemzően szimmetrikus volta miatt a rács síkjával párhuzamos  $v_{sd}$  és  $w_{sd}$  értékek közel megegyezők (tehát arányuk közel egységnyi), így az ilyen síkokban jó közelítéssel izotrópiáról beszélhetünk (Comte-Bellot & Corrsin, 1966), ekkor a nyíróerők közel zérusok. Ezzel szemben rácesturbulenciánál az  $u_{sd}/v_{sd}$ , továbbá – az előzőek alapján –  $u_{sd}/w_{sd}$  az egységnyitől jellemzően nagyobb értékű (számos kísérlet eredményeit vizsgálva az  $u_{sd}/v_{sd}$  arány átlagos értéke közel 1,12 (minim 1,0, maximum: 1,22), (Roach, 1987)). Ezek az értékek természetesen igen messze állnak az izotrópia által megkívánt egységnyi értéktől, azonban a vonatkozó szakirodalom mégis izotrópként (kvázi-izotrópként) kezeli a rácesturbulenciát. A vizsgálataim során több esetben is meghatároztam a vizsgált rácsot követően kialakuló áramlás izotrópia-arányát ( $i$ ), amelyet az alkalmazott, két sebességkomponens ( $u$  és  $v$ ) egyidejű mérését biztosító méréstechnika tett lehetővé és célszerűen a 4.4-es összefüggéssel definiáltam:

$$i = \frac{u_{sd}}{v_{sd}}. \quad (4.7)$$

Az előzőekben bemutatott, térbeli eloszlástól függő mennyiségeken túl számos olyan jellemző is kiszámítható, amely adott pontbeli tulajdonságot tükröz. Ezek közül az első, talán legáltalánosabb mennyiség a turbulencia-fok ( $\equiv$ turbulencia-intenzitás), amely a turbulencia erősségére jellemző mennyiség. Rácesturbulencia esetén két típusát szokás definiálni: az alapáramlás irányú ( $x$ ) turbulencia-fok ( $T_u$ ), illetve a keresztirányú turbulencia-fokok ( $T_v, T_w$ ). Az általam a vizsgált rácsok esetében a turbulencia jellemzésére használt alapáramlás-irányú globális turbulencia-fokot a 4.8 összefüggés szerint definiáltam, továbbá a két keresztirányú turbulencia-fok a 4.9 és a 4.10 alapján számítható:

$$T_u = \frac{u_{sd}}{U_{ref}}, \quad (4.8)$$

$$T_v = \frac{v_{sd}}{U_{ref}}, \quad (4.9)$$

$$T_w = \frac{w_{sd}}{U_{ref}}. \quad (4.10)$$

Elterjedten az alapáramlás irányú ( $x$ ) turbulencia-fokkal szokás jellemezni a rácsturbulenciát, így vizsgálataim során én is e mennyiséget határoztam meg. Mivel a rácsturbulencia elhaló jellegű, így a turbulencia-fok is folyamatosan csökken a rácstól távolodva (negatív kitevőjű hatványfüggvény-jellegű (Roach, 1987)). E jelleg a méréseim alapján is bizonyítást nyert.

A fajlagos turbulens kinetikus energia ( $k$ ) egy olyan energia-jellegű skalármennyiség, amely a turbulens áramlás energiatartalmára jellemző, s így mindhárom sebességkomponens ingadozásának alapján, azok szórásnégyzetéből kalkulálható. Kiszámítása a mért sebességkomponensek szórásainak ismeretében – a részleges, a ráccsal párhuzamos irányokban feltételezhető izotrópia figyelembevételével ( $v_{sd} \approx w_{sd}$ ) – a 4.11 összefüggéssel lehetséges (Pope, 2000):

$$k \approx \frac{1}{2} \cdot (u_{sd}^2 + 2 \cdot v_{sd}^2). \quad (4.11)$$

Az izotrópia feltételezésére azért is szükség volt, mivel a méréseimhez alkalmazott CTA (állandóhőmérsékletű légsebesség-mérés) mérés technika csupán két sebességkomponens (az alapáramlás ( $x$ ) irányú,  $u$  és az arra merőleges, vízszintes ( $y$ )  $v$  mérését tette lehetővé.

Elhaló turbulencia esetén a turbulens kinetikus energia nyilvánvalóan csökken a rácstól mért távolság (másképp az áramlási átlagsebességgel együtt mozgó koordináta-rendszerből nézve az idő ( $t$ ), mint független változó) függvényében. A  $k$  végtelenül kicsiny időintervallumhoz tartozó megváltozásának negáltja pedig nem más, mint a turbulens kinetikus energia disszipációs ráta ( $\varepsilon$ ), amely a 4.12 összefüggéssel számítható:

$$\varepsilon = -\frac{dk}{dt}. \quad (4.12)$$

Ennek meghatározásához tehát szükséges lenne ismernünk  $k$  időfüggvényét, azaz az áramlással együtt mozogva kellene figyelni  $k$  csökkenését. Mivel a vizsgálataimhoz alkalmazott CTA mérés technika egy-egy mérés esetén a tér egyetlen pontjában képes mérni a sebességet, így az  $\varepsilon$  kiszámítására szolgáló összefüggést alapjaiban más irányból kellett megközelítenem. Lokális izotrópiát feltételezve (pl. Larssen & Devenport (2002) alapján), továbbá alkalmazva Taylor (1938b) fagyott örvény hipotézisét, a disszipációs ráta megbecsülhető az idősor energiaspektrumából is. Ennek alapján  $\varepsilon$  becsléséhez a sebesség-idősorból számított egydimenziós teljes energiaspektrumot ( $E(\kappa)$ ) használtam fel (4.13 összefüggés) Pope (2000) alapján:

$$\varepsilon = \int_0^{\infty} 2\nu\kappa^2 E(\kappa) d\kappa, \quad 4.13$$

ahol  $\nu$  a levegő kinematikai viszkozitása,  $\kappa$  pedig a hullámszám, amely arányos az áramlás egységnyi hosszúságú szakaszában jelen lévő, adott léptékű örvények számával (4.14):

$$\kappa = \frac{2\pi f}{U_{ref}}. \quad 4.14$$

A 4.13-as összefüggésben szereplő integrálás felső határa a definícióban szereplő végtelen nagy hullámszám, azonban ez numerikus számításoknál nem alkalmazható. Ezért számításaim során az integrálás felső határát a Shannon mintavételi törvény alapján a mérésnél alkalmazott mintavételi frekvencia ( $f_s$ ) felével számított hullámszámnak választottam. A teljes energiaspektrum,  $E(\kappa)$  a mért  $u'(t)$  és  $v'(t)$  sebességkomponens ingadozások alapján számított  $E_u(\kappa)$  és  $E_v(\kappa)$  spektrumokból kalkulálható, s itt is alkalmaztam a részleges izotrópia feltevést ( $v_{std} \approx w_{std}$ ). Az egyes sebességkomponens ingadozások idősoráiból az energiaspektrumokat a *MATLAB* szoftver beépített *psd* függvényével (spektrális energiasűrűség függvény) állítottam elő. Ezek alapján a teljes energiaspektrum a 4.15 összefüggéssel adódott:

$$E(\kappa) = \frac{1}{2} [E_u(\kappa) + 2E_v(\kappa)]. \quad 4.15$$

A 4.15 összefüggés helyességét a 4.16 egyenlettel ellenőrizhettem, hiszen definíció szerint (Pope, 2000) az energiaspektrum-függvény alatti terület nem más, mint a fajlagos turbulens kinetikus energia,  $k$ :

$$k = \int_0^{\infty} E(\kappa) d\kappa. \quad 4.16$$

Viszont ez a mennyiség direkt módon, a már bemutatott 4.11 összefüggés alapján is számítható.

Mivel a disszipációs ráta igen fontos mennyiség a turbulencia jellemzésére, viszont mértékegységgel rendelkezik, így a különböző kísérletek esetén kapott értékek nem hasonlíthatók össze egymással. Ezért egy olyan dimenziótlanított mennyiséget kellett megalkotni, amely jellemzi a disszipációs rátát, de mértékegység nélküli, így már független a mérőrendszer jellemzőitől. Erre a disszipációs konstans ( $C_\varepsilon$ ) mennyiséget alkalmazhatjuk, amely a szakirodalom alapján:

$$C_\varepsilon = \varepsilon L u_{rms}^{-3}, \quad (4.17)$$

ahol  $L$  az úgynevezett alapáramlás irányú integrál hosszlépték. Ez a hosszlépték az áramlásban jelen lévő legnagyobb örvények méretére jellemző mennyiség:

$$L = U_{ref} T, \quad (4.18)$$

ahol  $T$  az alapáramlás irányú integrál időlépték. Definíció szerint ennek meghatározása az alapáramlás irányú sebességkomponens ( $u$ ) idősorának normalizált autokorrelációs

függvényéből számítható. Esetemben  $T$  értéke megegyezett a normalizált autokorrelációs függvény első nullátmenetéig számított integráljával:

$$T = \int_0^{\tau_0} r_u(\tau), \quad (4.19)$$

ahol  $r_u(\tau)$  az  $u$  sebességkomponens idősorának normalizált autokorrelációs függvénye,  $\tau_0$  pedig a korrelációs függvény első null-átmenetének abszcisszája. Ennek meghatározása szintén a *MATLAB* programmal történt numerikus úton. Az így előállított  $C_\varepsilon$  mennyiség értéke már összehasonlítható más, a szakirodalomban ismertett mennyiségekkel.

Miként azt már megfogalmaztam, a turbulens áramlásban különböző méretű örvények vannak jelen. Az örvények mérete alapján karakterisztikus hosszléptéket definiálhatunk, de ebből megfelelő átalakításokkal sebességléptéket és időléptéket is használhatunk az örvények jellemzésére. A nagy örvények instabilak, ezért azok folyamatosan kisebb örvényekre esnek szét, így az eredeti örvény kinetikus energiája is szétszóródik a kisebb örvényekben. Ezek a kisebb örvények aztán még kisebbekre esnek szét, amelyek energiájukat mindig az őket létrehozó örvényből nyerik. Így tehát az energia a nagyobb léptékektől folyamatosan a kisebb léptékek felé áramlik – ezt nevezzük Richardson-féle energiakaszkádnak (Richardson, 1922) – mindaddig, amíg az örvények hosszléptéke olyan kicsiny nem lesz, hogy ott már a viszkozitás hatására ez az energia disszipálódik, s így a kinetikus energia belső energiává alakul, a legkisebb léptékű örvények megszűnnek.

Kolmogorov (1890) elméletében azt feltételezte, hogy igen nagy értékű Reynolds-szám esetén a kis léptékű turbulens mozgások statisztikailag izotrópok. Általánosságban a nagyobb léptékek nem izotrópok, mivel ezek a léptékek a rendszer geometriai peremfeltételeitől függenek. Kolmogorov úgy vélte, hogy ezek a geometriai és irányultsági információk elvesznek az energia-kaszád alatt a kisebb léptékek felé haladva, így a kisebb léptékeknek statisztikailag univerzálisnak kell lenniük: minden – megfelelően nagy Reynolds-számú – turbulens áramlás esetén ezek a léptékek azonosak, függetlenül az áramlás fizikai peremfeltételeitől.

Ezek alapján tehát Kolmogorov megállapította, hogy az energiakaszádban a két fő folyamat az energiaátvitel az egyes léptékek között és a viszkozus disszipáció a kisebb léptékeken. Ebből adódóan valószínűen helyes az a feltevés, hogy e két folyamatot irányító fontos paraméterek egyrészt az energiaáram, amelyet a kis léptékek a nagyobbaktól kapnak, továbbá pedig a viszkozitás. Így tehát megállapítható, hogy a kis léptékek statisztikailag univerzális állapota a viszkozitással és az energiaárammal definiálható. Stacionárius esetben pontosan olyan sebességgel kell az energiának disszipálnia (disszipációs ráta,  $\varepsilon$ ), mint ahogy az az energiakaszádon keresztül érkezik a kisebb léptékekhez. Ennek okán tehát  $\varepsilon$  és  $\nu$  együttesen jellemzik az izotróp turbulenciát. Dimenzióanalízis segítségével e két mennyiség felhasználásával meghatározhatók az ún. Kolmogorov-léptékek, amelyek a következők:  $\eta$  – Kolmogorov-hosszlépték (4.20),  $\tau_\eta$  – Kolmogorov-időlépték (4.21) és az  $u_\eta$  – Kolmogorov-sebességlépték (4.22):

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}, \quad (4.20)$$

$$\tau_\eta = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2}, \quad (4.21)$$

$$u_\eta = (\nu \cdot \varepsilon)^{1/4} . \quad (4.22)$$

Ezek tehát a turbulens áramlásban kialakuló legkisebb léptékek, mivel a disszipáció miatt ezen örvények kinetikus energiái igen gyorsan belső energiává, azaz hővé disszipálódnak. Itt érdemes még azt is megjegyezni, hogy a Kolmogorov-léptékekből képzett Reynolds-szám éppen egységnyi, azaz a tehetetlenségi erők ezeken a léptékeken megegyeznek a súrlódási erőkkel.

A rács-turbulenciának ugyancsak fontos jellemző mennyisége a Taylor-Reynolds-szám ( $Re_\lambda$ ), amely a Reynolds-számhoz hasonlóan egy jellemző sebesség és jellemző méret szorzatának a kinematikai viszkozitáshoz viszonyított arányát adja meg:

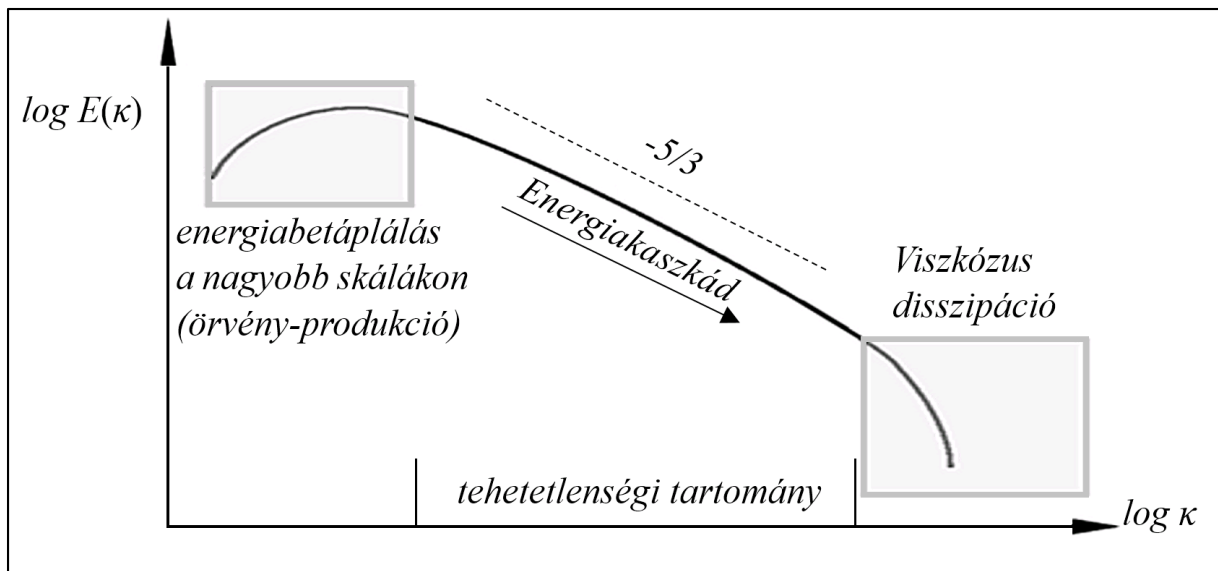
$$Re_\lambda = \frac{u_{sd} \cdot \lambda_g}{\nu} . \quad (4.23)$$

Ez esetben a jellemző sebesség az alapáramlás irányú sebességkomponens szórása ( $u_{sd}$ ), a jellemző méret pedig az ún. Taylor-mikrolépték ( $\lambda_g$ ). Ez a lépték – noha nem bír egyértelműen definiálható fizikai jelentéssel – nagyságában a  $k^{3/2}/\varepsilon$  összefüggéssel képzett hosszlépték és a Kolmogorov hosszlépték ( $\eta$ ) között helyezkedik el. Levezethető, hogy a 4.23 összefüggés izotróp turbulencia esetén  $k$ ,  $\varepsilon$  és  $\nu$  ismeretében a következő összefüggéssé alakítható át (Pope, 2000):

$$Re_\lambda = \left( \frac{20}{3} \cdot \frac{k^2}{\varepsilon \nu} \right)^{1/2} . \quad 4.24$$

## 4.2.A turbulens kinetikus energia spektrális eloszlása

A turbulenciát nem csak skaláris mennyiségekkel jellemezhetjük, hanem például a már említett energiaspektrum is egy fontos jellemzője annak, hogy milyen módon oszlanak meg az egyes léptékekhez társított kinetikus energiák. Amennyiben az energia-eloszlást spektrálisan ábrázoljuk, úgy a hullámszám függvényében három tartományt szokás megkülönböztetni, amelyet a 8. ábra szemléltet. A legkisebb hullámszámokhoz (azaz a legnagyobb örvényekhez) tartozik az örvény-produkció tartománya, mivel az áramlási tér térbeli jellemzői okán itt képződnek az áramlásban jelen lévő legnagyobb méretű örvények. Ezt követi a tehetetlenségi tartomány, amit nagy értékű Reynolds-számok jellemeznek, így a tehetetlenségi erők dominálnak. E tartományban valósul meg az energiakaszád, ami az energiát egyre kisebb méretű léptékek felé irányítja. Kolmogorov levezette, hogy ebben a tartományban az energiakaszádot egy hatványfüggvény írja le, amely elméletileg  $(-5/3)$ -os hatványkitevőjű (log-log skálán tehát egy  $(-5/3)$ -os meredekségű egyenes). Minél nagyobb Reynolds számmal jellemezhető az áramlás, annál szélesebb tartományt ölel át a tehetetlenségi tartomány. Fontos megállapítás, hogy teljesen kialakult turbulenciáról csak megfelelően széles tehetetlenségi tartománnyal rendelkező áramlás esetén beszélhetünk, mivel így az egyes léptékeken keresztülhaladva alakulhatnak ki az izotróp és univerzális kis léptékek. Ezért a szélcsatorna-kísérleteknél cél az, hogy a beépített turbulenciagenerátorral minél szélesebb tehetetlenségi tartományt lehessen elérni.



8. ábra Elméleti spektrális energia-eloszlás kialakult turbulencia esetén.

Méréseim során az alkalmazott állandó hőmérsékletű sebességmérő technika alkalmas volt adott mérőpontban igen nagy mintavételi frekvenciával, hosszú mintavételezési időn keresztül adatot szolgáltatni a pillanatnyi sebességértékéről, így a kapott idősorokat Fourier-transzformációnak alávetve meghatározhattam a turbulens kinetikus energia spektrális eloszlását.

## 5. A LABORATÓRIUMI KUTATÁSAIM SORÁN ALKALMAZOTT MÉRÉSTECHNIKÁK

A turbulenciagenerátoros vizsgálataim során mind a generátor által létrehozott áramlás jellemzőit, mind pedig maguknak, a generátoroknak a működési sajátosságait is megvizsgáltam.

A kialakult áramlás vizsgálatához olyan mérési elvet kellett találnom, amely egyrészt megfelelő pontosságú (mind térben mind pedig időben), másrészt pedig rendelkezésemre áll a kutatóhelyen. Erre a célra szakirodalmi ajánlások (pl. Comte-Bellot, 1976; Saarenrinne & Piirto, 2000; Jørgensen, 2002; Lavoie et al., 2007) és rendelkezésre állásuk alapján a részecskeképeken alapuló sebességmérési technikát (*PIV*) és a már említett hődrótos légsebességmérő technikát (*HWA*) alkalmaztam. Azonban a Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszékének laboratóriumában a *PIV* méréstechnikával elvégzett mérések eredményei alapján azt a következtetést kellett levonnom, hogy megfelelő méretű mérési intervallum esetén sajnos nem elégséges a rendszer térbeli felbontása, így az nem alkalmas a turbulencia kisebb léptékeinek vizsgálatához. Ezért a hődrótos méréstechnika alkalmazása mellett döntöttem, mivel ennek alkalmazhatóságát számos, rács-turbulencia laboratóriumi vizsgálatát ismertető szakirodalom is igazolja.

Az áramlás vizsgálata mellett a rácsok aktív elemeinek dinamikáját is szerettem volna feltérképezni, ezért a két vizsgált rács esetén nagysebességű kamerát is használtam. A rezgőszalagos rács esetében ennek segítségével meghatároztam a rezgés jellegét, amely az eredmények alapján a fémszalagok elcsavarodásának periodikus jellegét mutatta. A préslevegővel aktivált rács esetében pedig feltérképeztem az aktív elemek (szilikoncsövek) mozgásformáit, így igazolhattam azt a feltevésemet, miszerint ezek sztochasztikus jellegű mozgást végeznek.

A részletezett vizsgálataimon túl arra is kerestem a választ, hogy alkalmas-e a préslevegős rács ipari alkalmazásra: különböző fluidumok keverésének intenzifikálására. Ebből a célból egy olyan mérési összeállítást készítettem, amellyel inhomogén hőmérsékletű áramlást hoztam létre, majd azt a rácson keresztüláramoltatva, különböző távolságokban vizsgáltam a hőmérsékletmező homogenitását (az elkeveredettségek fokát). E vizsgálataimhoz hőkamerát alkalmaztam.

Az egyes mérések esetén természetesen számos egyéb, az adott vizsgálat által megkövetelt mennyiség mérésére is szükség volt (hőmérséklet, nyomás, térfogatáram, stb.); az e mennyiségek méréséhez használt műszereket az adott mérés leírásánál fogom részletezni.

### 5.1. Hődrótos légsebesség-mérés (*HWA*)

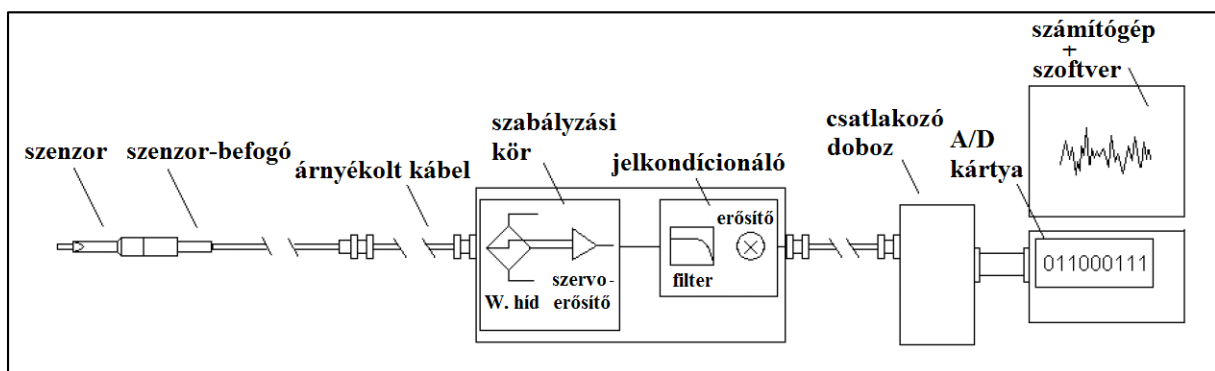
A hődrótos légsebességmérő technika kifejezetten alkalmas olyan pontbeli vizsgálatokhoz, ahol fontos a nagy időbeni felbontás, továbbá a térbeli kiterjedésében kicsiny mérési intervallum. Alapvetően a mért jel analóg, azonban ahhoz, hogy számítógéppel feldolgozható legyen, egy *A/D* átalakítóval digitális jellé alakul. Röviden összefoglalva maga a méréstechnika a légsebességgel szorosan összefüggő konvektív hőátadáson alapul, mivel lényegében egy, az áramló közeg hőmérsékletétől (elektromos árammal) magasabb hőfokra melegített mérőszál villamos ellenállásának változását méri és/vagy szabályozza a rendszer. Minél nagyobb az áramló közeg sebessége, annál intenzívebb a hő elszállítása a fűtött szálról is, amit viszont a mérőrendszer detektál, s megfelelő átalakítások után ebből pillanatnyi sebességjelet kalkulál.



Alapvetően kétfajta hődrótos mérési módszer terjedt el: az állandó áramú (CCA) és az állandó hőmérsékletű (CTA). Mindkét módszernél olyan mérőszálat alkalmaznak, amelynek ellenállása (s ekképp a rajta eső elektromos feszültség értéke) függ annak hőmérsékletétől.

Az állandó áramú mód esetén a mérőszondában található mérőszálon a mérőrendszer időben állandó értékű áramot folyat át, amely hatására a szálon – annak ohmos ellenállása okán – Joule-hő keletkezik, amely miatt az felmelegszik. A hőmérséklet növekedésével együtt nő a hőleadása (döntően konvekció útján) mindaddig, amíg az egyensúlyi állapot ki nem alakul. Ekkortól a keletkező Joule-hő megegyezik az elszállított hővel, tehát a rendszer egyensúlyba kerül. Ilyenkor a mérőrendszer közvetlenül a szál feszültségességét méri, amely az adott hőmérséklethez tartozó ellenállás alapján az Ohm-törvényből adódik. Amennyiben a szondát áramló közegbe helyezzük, úgy a megnövekedett kényszerkonvekció hatására igen rövid időn belül egy újabb egyensúlyi állapot áll be: a szonda hőmérséklete csökken, minek okán az ellenállása is lecsökken (pozitív ellenállás-tényező esetén). A kisebb ellenállású szálon így kisebb feszültség fog esni, amit a mérőrendszer detektál. Megfelelő, – előzetesen felvett – kalibrációs függvény esetén így tehát a rendszer adott feszültségértékhez hozzárendel egy adott áramlási sebességet. E mérési mód azonban szakirodalmi ajánlások (pl. Comte-Bellot, 1976) alapján jellemzően összenyomható áramlások vizsgálatára alkalmas, ahol is hőmérséklet-fluktuációk alakulnak ki.

Méréseimhez tehát az állandó hőmérsékletű módban (CTA) működő mérőrendszert alkalmaztam. Ebben az esetben a rendszer egy megfelelően magas hőmérsékleti értékre melegíti fel a mérőszálat, amely hőmérsékleten a rajta átfolyó áram által felszabaduló Joule-hő éppen megegyezik a szál által a környezete felé leadott hővel (egyensúlyi állapot). Amennyiben a közeg áramlása okán megnő a konvekció, úgy a mérőszál hűlni kezd, amit a rendszer egy beépített Wheatstone-híd segítségével (a csökkenő ellenállás és feszültség hibajelét hoz létre) igen gyorsan detektál. Egy szervo-erősítő ekkor növeli a szálon átfolyó áram erősségét mindaddig, amíg a beállított hőmérséklethez tartozó ellenállásból számítható feszültségesség nem lesz ismét mérhető a szondán. Így tehát igen rövid válaszidőn belül visszamelegszik az érzékelő szál a kezdeti hőmérsékletre. A mérőrendszer felépítése s mérőláncának vázlatát a 9. ábrán látható.



9. ábra A CTA mérés technika mérési lánc.

A méréseimhez a Tanszék laboratóriumában rendelkezésemre álló kétcsatornás DANTEC Dynamics StreamLine CTA típusú rendszert használtam az azt működtető StreamWare® 4.10 verziójú szoftverrel (további adataikat az M3 melléklet tartalmazza). Az e mérőrendszeren elvégzett mérések előtt szükséges volt a mérőszonda kalibrálása, amelyet a DANTEC Dynamics

*StreamLine Pro* kalibrátorral végeztem el (ennek fontosabb adatait az **M4** melléklet tartalmazza). Ez az eszköz a *StreamWare®* vezérlőszoftverrel üzemeltethető, s segítségével  $2 \cdot 10^{-3} \div 300$  m/s sebességtartományban kalibrálható a szonda, továbbá a kétkomponensű szondák esetén (amelyekkel két sebességkomponens is mérhető) az iránykalibráció is elvégezhető (ún. Pitch-Yaw kalibráció). Az egyes mérések kivitelezése előtt kiválasztottam az adott feladatnak megfelelő szondatípust (egy- vagy kétkomponensű), amelyet aztán a szélcsatornában beállítani kívánt sebességtartomány szerint kalibráltam. Amennyiben kétkomponensű szondát használtam a méréshez, úgy a szonda iránykalibrációját is el kellett végezni. Mivel maga a CTA berendezés analóg jelet szolgáltat, szükséges volt ennek a digitalizálása. Erre a célra a *National Instruments MIO 16 bit* típusú A/D átalakítóját használtam. Ahhoz, hogy a szondát pontosan az előre definiált mérési pontokban helyezhessem el egy, szintén a szoftver által működtetett háromtengelyes léptetőmotoros traverzrendszert alkalmaztam (*ISEL* típus, *IT116G ISEL* vezérlőegységgel). Ennek segítségével maximum 1010 mm-es elmozdulási tartományban, akár 0,5 mm-es pontossággal pozícionálható a szonda, amelyet a rezgőszalagos rács esetében az egyik traverzpalettára felszerelt, az áramlással párhuzamos merev alumínium kar mérőtérben található végére rögzítettem. A préslevegős rács esetén – mivel azt a vizsgálataim alatt egy másfajta felépítésű szélcsatornába építettem be – a traverzrendszer a szélcsatornán kívül, a mérőtér mellett lett elhelyezve. Ezért ebben az esetben a mérőtér egyik oldalfalán kimart pályán, oldalirányból tudtam a szondát bejuttatni az áramlásba. Ezekkel a megoldásokkal tehát biztosítottam a szélcsatornában kialakuló áramlás mérés technika által okozott minél kisebb mértékű megzavarását. E variációkat az adott vizsgálat bemutatásánál fogom részletezni.

## 5.2. Nagysebességű kamerák

Mindkét vizsgált, különböző elvet alkalmazó turbulenciagenerátor esetében közös az, hogy valamiféle mozgás segítségével hoznak létre igen jelentős erősségű turbulenciát. Ezért fontossá vált annak feltárása, hogy milyen mozgásformák jellemzik a generátorok működését.

A rezgő szalagos rács esetén az alapáramlás által indukált rezgés frekvenciája akkora értékű volt, hogy a mozgást szabad szemmel nem lehetett követni. Mivel a doktori kutatásom utolsó évéig nem állt rendelkezésemre nagysebességű kamera, ezért ennek első vizsgálatait stroboszkóp és digitális fényképezőgép segítségével végeztem el. E méréseimet aztán megismételtem az újonnan beszerzett nagysebességű kamerával, amelynek segítségével pontosan meghatározhattam a szalagok jellemző mozgásformáit, s azok frekvenciáját, továbbá a rezgés frekvenciájának a feszítőerőhöz és az áramlási sebességhez való viszonyát is.

A másik, légsugaras elven működő rács esetében talán még fontosabb volt információt gyűjteni arról, hogy az egyes rugalmas elemek milyen módon mozognak, miközben belőlük nagysebességű légsugarak jutnak az alapáramlásba. Mivel az alkalmazott csövecskék igen kis tömeggel, ezzel szemben nagy rugalmassággal rendelkeztek, s belőlük jelentős sebességgel áramlott ki a másodlagos levegő, ezért az áramlásból adódó reakcióerő jelentős gyorsulási értékeket eredményezett. Ebből adódóan a csövecskék olyan módon és sebességgel mozogtak (továbbá a mozgásuk során ütköztek), hogy azok vizsgálatához szintén elengedhetetlen volt a gyorskamera alkalmazása.

Az első vizsgálatokat a Magdeburgi Egyetemen végeztem el, amelyek során a megépített nagyméretű rácsnak csupán a középső,  $10 \times 11$  rácspontjában elhelyezett aktív elemek működtek. E vizsgálatokhoz az ott rendelkezésre álló *LaVision VC-Imager Pro HS 4M* típusú

CMOS-szenzoros gyorskamerát (**M5** melléklet) alkalmaztuk a mérőszámítógépben található 16 Gb RAM memóriával. A kamerához egy 105 mm-es fókusz távolságú, *AS Micro-Nikkor 105 mm f/2.8 D* típusú optikát alkalmaztunk. Ezzel az összeállítással sikerült különböző, az aktív elemekre jellemző mozgásformákat megfigyelni, továbbá dedikált számítógépes programmal (*MATLAB*) kielemezni.

A későbbiekben a légsugár-rács aktív elemeiként az addig használttól jóval rugalmasabb csőtípus került alkalmazásra, amely esetben csupán minden második rácspontban lettek elhelyezve aktív elemek; a többi rácspont ledugózásra került. Fontos kérdéssé vált, hogy az egyes aktív elemek mozgása között van-e valamilyen szintű lineáris kapcsolat, mennyire mondható a mozgásuk függetlennek a másik elem mozgásától? Mindezek megválaszolására – már Miskolcon – újabb gyorskamerás méréseket végeztem, amelyek során egy *Chronos 1.4 C* típusú gyorskamerát alkalmaztam (**M6** melléklet), amely monokróm *CCD* értékelőjével maximálisan 1280×1024 pixel felbontásra (1057 fps esetén), vagy a maximális frekvencián (38 565 fps) 336×96 pixeles képsor készítésére alkalmas.

Ehhez a kamerához két fajta optika állt rendelkezésre: *Fujian TV lens GDS-35 f=35mm*, továbbá egy *Computar 12.5-75mm f/1.2* zoom lencse. A kamera által készített képsorokat számítógéppel, kifejezetten erre a célra készített *MATLAB* scripttel dolgoztam fel.

### 5.3. Hőkamera

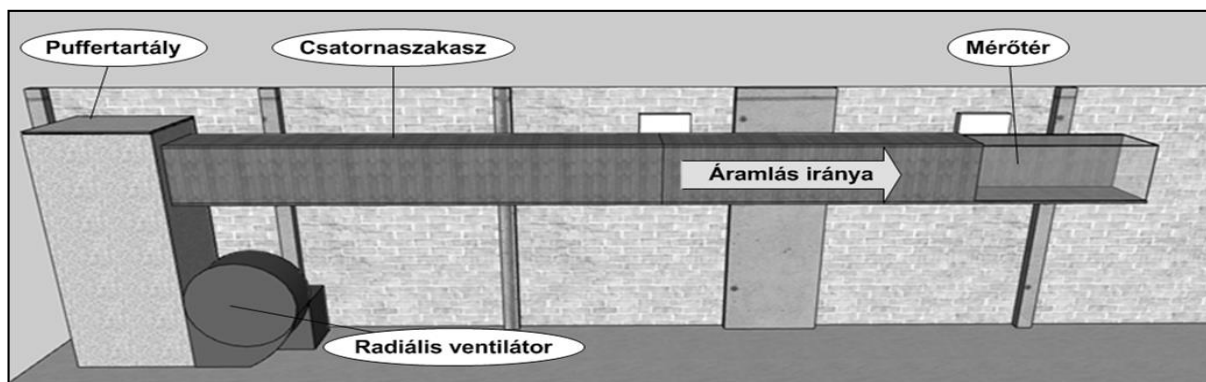
Ahhoz, hogy a légsugaras rács turbulens keveredésre gyakorolt hatását vizsgálhassam, a hőkamera alkalmazása mellett döntöttem, mivel segítségével jól detektálható egy adott (szilárd) felület hőmérséklet-eloszlása. Ennek ismeretében úgy állítottam össze a mérést, hogy a turbulenciagenerátor által okozott keverőhatás az utána kialakuló áramlás hőmérsékletmezéjén keresztül detektálható legyen. Erre a célra egy *Variocam HiRes 680* típusú hőkamerát építettem be a szélcsatornába (főbb adatait az **M7** melléklet tartalmazza). A *Jenoptik IR 1.0/30 LW* optikával ellátott kamera maximálisan 640×480 pixeles felbontása elegendőnek bizonyult a mérések elvégzéséhez, mivel az adott mérési összeállítás esetén ~1,2 mm/pixel térbeli felbontást tudtam elérni. A kamera által készített képeket ez esetben is általam erre a célra fejlesztett számítógépes programmal (*MATLAB*) dolgoztam fel.

## 6. SZÉLCSATORNÁK TERVEZÉSE ÉS FEJLESZTÉSE A RÁCS TURBULENCIA VIZSGÁLATÁHOZ

Annak érdekében, hogy a fejlesztendő rácsok áramlásra gyakorolt hatásait megvizsgálhassam, azokat olyan áramlási térbe kellett elhelyeznem, amely megfelelő minőségű és alapturbulenciájú áramlást biztosított. Az ilyen, laboratóriumban alkalmazott berendezések a szélcsatornák. A Tanszék laboratóriumában a kutatásom kezdetekor már rendelkezésre állt két visszatérő áramú szélcsatorna, azonban – különböző okok miatt – ezek egyikével sem tudtam megkezdeni kutatásaimat. Ezért az első feladatom egy, a méréseimhez alkalmas szélcsatorna tervezése és összeállítása volt. Először egy meglévő rövid csatornaszakaszt alakítottam át, azonban az ebben elvégzett vizsgálatok alapján egyértelművé vált, hogy a létrehozott áramlás minősége messze nem felel meg a precíz mérések kivitelezéséhez (Szaszák et al., 2012b). Ezért – az összegyűjtött tapasztalataimat is felhasználva – egy nagyobb keresztmetszetű és hosszabb szélcsatornát terveztem meg, majd állítottam össze. Az ebben a csatornában több áramlásrendező-variáció szisztematikus vizsgálatával sikerült egy olyan végleges verziót összeállítanom, amelyet aztán a rezgő-szalagos rács vizsgálataihoz megfelelőnek találtam.

### 6.1. Új szélcsatorna tervezése és összeállítása

A mini szélcsatorna összeállítása és mérése után arra a következtetésre jutottam, hogy a rácsvizsgálatokhoz mindenképpen a megépítettől jóval nagyobb teljesítményű ventilátorra lesz szükségem. A szakirodalom alapján (Roach, 1987; Pinker, 1967) egyértelművé vált, hogy bármilyen vizsgálandó (passzív) rács jelentős nyomásesést okoz a rajta keresztülhaladó áramlásban, amely többek között a rács kitöltési tényezőjétől ( $\sigma$ , lásd 8.1 összefüggés), az áramlás dinamikus nyomásától, továbbá a Reynolds-számtól is függ. Ekkor azonban a megnövekedett nyomásesés teljesítményigényét a szélcsatorna ventilátorának kell biztosítani. Ezért következő lépésben egy nagyobb méretű, s egy jóval nagyobb teljesítményű radiális ventilátort tartalmazó, ugyancsak kifúvó típusú, nyitott rendszerű szélcsatornát terveztem, majd állítottunk össze a munkatársaimmal. A szélcsatorna látványterve a 10. ábrán tekinthető meg.

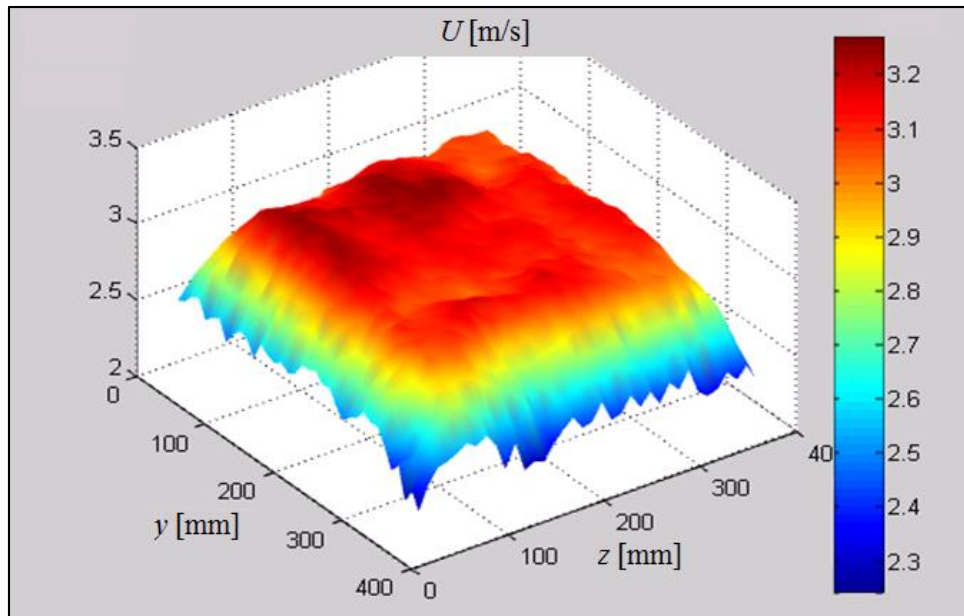


10. ábra A rezgőszalagos rács vizsgálatához összeállított szélcsatorna.

E csatornát 400×400 mm belső keresztmetszetűre terveztem, mivel ezt a méretet megfelelőnek találtam a későbbi aktív-rács beépíthetősége, s vizsgálhatósága szempontjából. A szélcsatornában az áramlás rendezésére elterjedten alkalmazott diffúzor-konfúzor szakasz

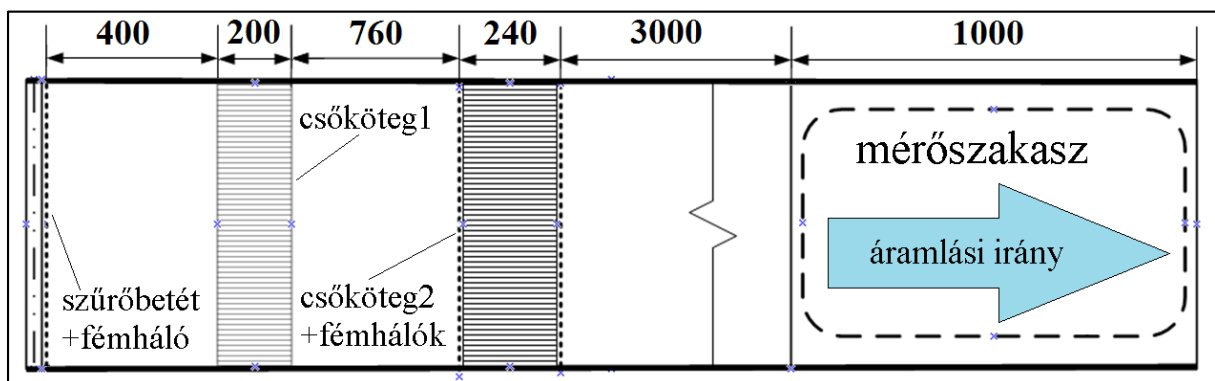
helyett (egyszerű konstrukcióra törekedve) egy puffertartályt, s egy hozzá csatlakoztatott megfelelően hosszú csatornaszakaszt terveztem az 1 m hosszúságú mérőtér elé. Az áramlás egyenletességének növelésére ezért egy relatíve hosszú, 4,6 m-es csatornaszakasz került kialakításra a mérőtér előtt. Ez a csatorna hidraulikai átmérőjéhez ( $D_H=0,4$  m) viszonyítva 11,5-szeres hosszúnak felel meg, amely tehát önmagában is áramlásrendező hatással bír. A későbbiekben ennek a csatornaszakasznak a puffertartály felőli részében áramlásrendező elemeket helyeztem el a mérőtér-áramlás minőségének további javítása céljából. A megfelelő minőségű áramláshoz a végleges összeállításban 5×5 mm-es osztású, 1 mm átmérőjű áramlásrendező fémhálók, egy 23 mm-es külső átmérőjű, 1,5 mm-es falvastagságú, 200 mm hosszú műanyag csövekből összeállított csököteg, továbbá egy 6 mm-es külső átmérőjű, 0,1 mm-es falvastagságú, 240 mm hosszú műanyag csövekből álló csököteg lett elhelyezve. A szélcsatorna megfűvására egy háromfázisú, 4,3 kW-os villanymotorral szerelt radiális ventilátor gondoskodott, amelyet frekvenciaváltóval vezérelve lehetőség volt az áramlás sebességének beállítására. A ventilátor és a csatorna közé egy puffertartályt lett beépítve, szintén áramlásrendező szerepe miatt. Ahhoz, hogy a mechanikai hatásokra kifejezetten érzékeny CTA technikát alkalmazhassam, az előbb említett elemeken túl egy filcszűrő-betét is beépítésre került közvetlenül a csatorna puffertartály felőli végén. A megfelelő minőségű áramlás létrehozása e csatorna esetén tehát nem diffúzorral történt, hanem a puffertartály, az áramlásrendezők és a hosszú bevezető csőszakasz együttesével.

A csatornaszakaszban az áramlásrendező elemek legmegfelelőbb pozicionálása végett, azok különböző beépítési eseteiben vizsgáltam meg a mérőtérben kialakuló áramlást. Erre a célra szintén a CTA mérés technikát alkalmaztam egykomponensű, 55P11 típusú mérőszondával (M3 melléklet): a mérőtéren belül, a kilépéstől 100 mm-re lévő síkban, 350×350 mm-es keresztmetszetben, 10×10 mm-es rácsközű raszter pontjaiban lettek kimérve az időátlagolt sebességértékek, továbbá a turbulencia-fokok. Ezeket később a MATLAB programban dolgoztam fel: a térbeli átlagok, az eloszlás-diagramok, továbbá a turbulencia-fok hisztogramok is meghatározásra kerültek. A különböző mérési esetek eredményeiről a Szaszák & Szabó (2013a) konferenciacikkben számoltunk be. A legjobb variációhoz tartozó turbulencia-fok értéke (a középső, 250×250 mm-es tartományra átlagolva,  $U_{ref} \approx 10$  m/s átlagsebesség estén)  $T_i \approx 2\%$ -ra adódott, miközben kisebb,  $U_{ref} \approx 3$  m/s átlagsebesség estén  $T_i \approx 3,5\%$ -ot kaptam. A mérőtér áramlásra merőleges, 350×350 mm-es keresztmetszetében végzett CTA mérés  $U_{ref} \approx 3$  m/s sebességhez tartozó sebesség-eloszlását szemlélteti a 11. ábra.



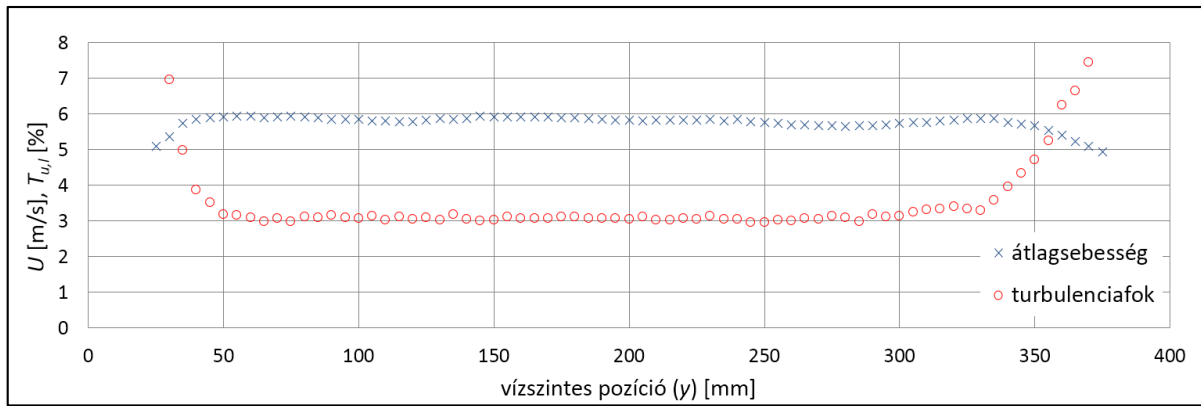
11. ábra MÉRŐTÉR-keresztmetszetbeli átlagsebesség ( $U$ ) profil  $U_{ref} \approx 3$  m/s esetén.

A megvizsgált, három különböző áramlásrendező-variáció eredményei eltértek, így meg kellett találnom a legoptimálisabb összeállítást, amelyet a rács-kísérletekhez használhattam. Mivel egyértelműen látszott a beépített csököteg és a fémháló pozitív hatása, ezért úgy döntöttem, hogy további elemeket helyezek el a csatornában. További vizsgálataim alapján (kisebb és nagyobb áramlási sebességek, további mérési síkok/vonalak) a 12. ábrán látható variáció alkalmazása mellett döntöttem.



12. ábra A végleges áramlásrendező-variációt tartalmazó szélcsatorna-szakasz.

A méréseket a mérőtér vízszintes középvonalában ( $y$ ), a kilépéstől 100 mm-re végeztem el a középső, 350 mm széles egyenes mentén. Ezen összeállítás esetén kapott pontbeli átlagsebesség és lokális, azaz az pontbeli átlagsebesség-értékre vonatkoztatott alapáramlás irányú turbulencia-fok ( $T_{u,l}$ ) értékeket a 13. ábrán látható diagram segítségével szemléltetem. A diagramból látható, hogy mind a turbulencia-fok, mind pedig az átlagsebesség megfelelően homogén eloszlású a csatorna középső részében, s az egyes variációk összehasonlítása (Szaszák, 2013; Szaszák & Szabó, 2013a) alapján ezen áramlásrendező-variáció esetén alakult ki a leghomogénebb áramlás.



13. ábra A két csőköteget tartalmazó variáció eredményei adott ventilátor-fordulatszám esetén. Pontbeli átlagsebesség ( $U$ ) és lokális, alapáramlás irányú turbulencia-fok ( $T_{u,l}$ ).

E mérési eredményeim alapján tehát sikerült egy olyan összeállítást találnom, amely segítségével a későbbi rács-méréseimhez megfelelő minőségű alapáramlást tudtam létrehozni. Mivel egy olyan rácsot készítettem el (rezgő-szalagos rács), amely felépítéséből adódóan külső merevítő keretet igényelt, így a későbbiekben vizsgált szalag-rácsok (műanyagból, majd acélból) e szélesatornának a mérőterébe lettek beépítve. E csatorna esetén ugyanis a mérőtér tekintetében a külső- belső hozzáférés biztosított volt a csatorna szétszerelése nélkül.

## 7. KÜLSŐ ENERGIAFORRÁST NEM IGÉNYLŐ AKTÍV RÁCS ÖSSZEÁLLÍTÁSA, ÁRAMLÁSTECHNIKAI VIZSGÁLATA

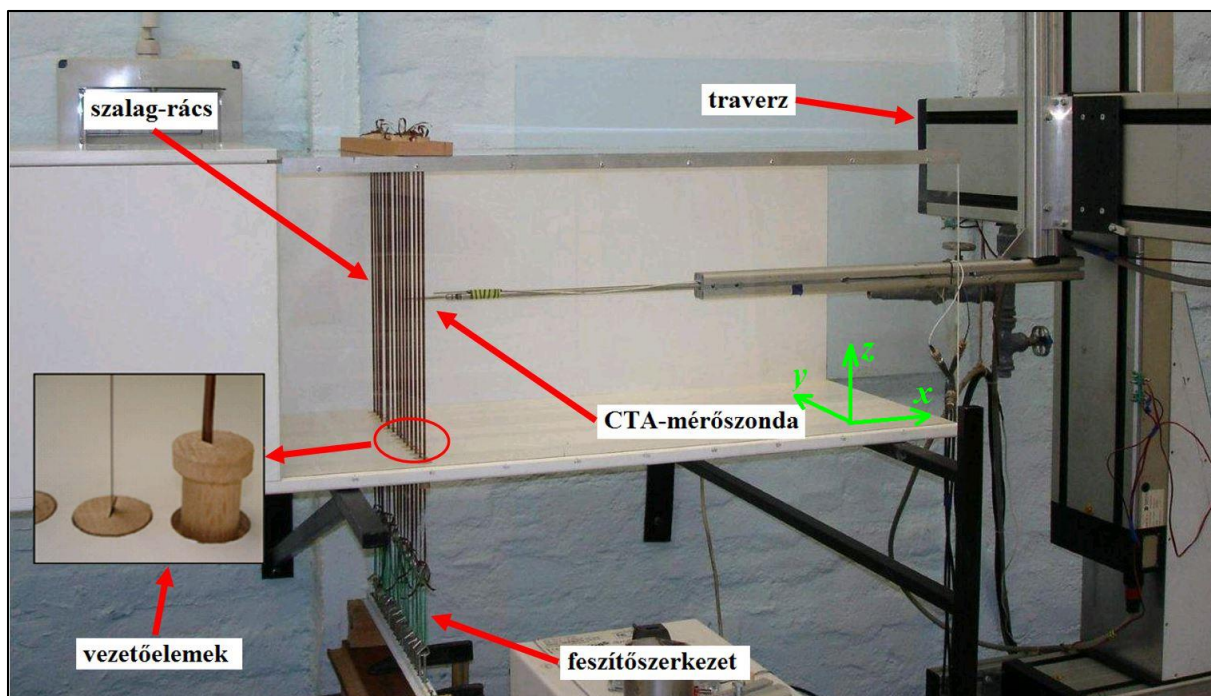
Párhuzamosan a csatorna építésével és vizsgálataival, új típusú aktív rács összeállításával is foglalkoztam. Akkor saját elgondolásom alapján egy olyan aktív turbulenciagenerátort építettem meg, amely rácselemeinek mozgásával hoz létre intenzívebb örvényleválást, s ekképp növeli meg a turbulenciát. Mindezt úgy teszi, hogy a mozgásához szükséges energiát magából az alapáramlásból nyeri. Emiatt ez a rács – bár a működését tekintve aktív típusú – nem igényel külső plusz energiaforrást. A turbulencia növeléséhez az energiát a rááramló levegő nyomásából nyeri, amelyet a szélcsatorna ventilátora maga állít elő. A rács igen egyszerű felépítésű, olyan függőleges rácselemekből áll, amelyek vékony, keskeny rugalmas szalagok, s amelyek síkjai nyugalmi állapotban közel párhuzamosak a csatorna hossz tengelyével. E szalagok megfelelő erősségű légáram hatására periodikus rezgő-csavaró mozgást végeznek.

Az első ilyen prototípus rácselemei 3,81 mm széles és 15  $\mu\text{m}$  vastagságú poliészterszalagból épültek fel, amelyek azonban a mérések folyamán gyakran elszakadtak. Ezért az eszköz továbbfejlesztéseként a későbbiekben acéllemez-szalagokat alkalmaztam aktív elemekként, amelyek jóval ellenállóbbnak bizonyultak. Ezek geometriai jellemzői: szélességük 6 mm vastagságuk 50  $\mu\text{m}$ . Mindkét rács  $M=25$  mm-es rácsállandóval rendelkezett, így a 400 mm-es szélességű csatornába összesen 15 db szalagot tudtam beépíteni. Az  $M$  rácsállandó ebben az esetben – a szalagok elhanyagolható, alapáramlásra merőleges kiterjedése miatt – jó közelítéssel megegyezik a szalagok közötti távolsággal. A kialakuló turbulencia jellemzőinek meghatározásához szükséges méréseket az első, poliészter anyagú rács esetében is végeztem (Szaszák & Szabó, 2013b; Szaszák & Szabó, 2014a,b), azonban jelen dolgozatban csupán a továbbfejlesztett, erőmérővel és mechanikus feszítőszerkezettel ellátott rácson elvégzett mérések eredményeit mutatom be részletesen.

### 7.1. Poliészter-szalagokból felépített rács összeállítása és vizsgálata

Az első rezgő szalagos variáció tehát műanyag szalagokat tartalmazott, amelyek az áramlás hatására rezgőmozgást végeztek. Ahhoz, hogy a rácsot a csatornába építhessem, a csatorna mérőterének alsó és felső falán, a mérőtér kezdetétől 200 mm-re lévő vonalban furatokat készítettem, majd a szalagokat ezeken keresztül vezettem át az áramlási téren. A szalagokat a csatorna felső lapján mereven rögzítettem, azonban az alsó lap alatt rugalmas gumiszálakkal csavarmenetes feszítőelemekhez csatlakoztattam ezeket annak érdekében, hogy a szalagok feszességét egymástól függetlenül lehessen módosítani. Ezzel a megoldással (itt még a feszítőerő egzakt mérése nélkül, csupán szubjektív megfigyelésre alapozva) úgy tudtam az egyes szalagok feszességét beállítani, hogy adott áramlási sebesség esetén mindegyik szalag közel megegyező amplitúdóval rezegjen. A csatorna falán készített furatokba olyan hengeres vezetőelemeket helyeztem el, amelyeken egy sugárirányú bevágás vezette meg a műanyag szalagokat. Így ezeknek az elemeknek a megfelelő elforgatásával tudtam a szalagokat az alapáramlás irányával párhuzamosan pozicionálni. Az első szalag-rács összeállítást a fontosabb részelemekkel és mérőegységekkel, továbbá az alkalmazott koordináta-rendszerrel a 14. ábra szemlélteti.



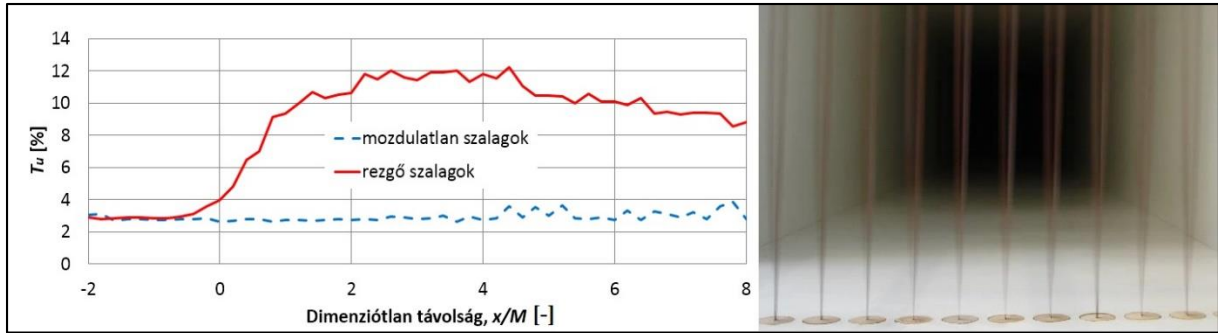


14. ábra A szélsatornába építet műanyag szalagos rács a csavaros feszítőszervezettel és a méréskor alkalmazott koordináta-rendszerrel.

### 7.1.1. Passzív és aktív működési mód összehasonlítása

A szalag-rács turbulenciára gyakorolt hatásának vizsgálatához *CTA* méréseket végeztem mind nyugalomban lévő (passzív mód), mind pedig rezgő (aktív mód) szalagok esetén. Különböző áramlási sebességek esetén, továbbá különböző mértékű feszítőerők esetén is vizsgáltam a kialakult áramlás jellemzőit. A méréseket a csatorna hossz tengelye ( $x$ ) mentén, a vízszintes középsíkban, továbbá a rácstól különböző távolságú, azzal párhuzamos ( $y$ - $z$ ) síkokban, átlós irányú vonalak mentén is elvégeztem (Szaszák & Szabó, 2013b; Szaszák & Szabó, 2014a,b). A közleményekben megjelent eredmények közül a továbbiakban csak a legfontosabbakat mutatom be, amelyek alapján ígéretesnek találtam az ötlet alkalmazhatóságát, továbbfejlesztését.

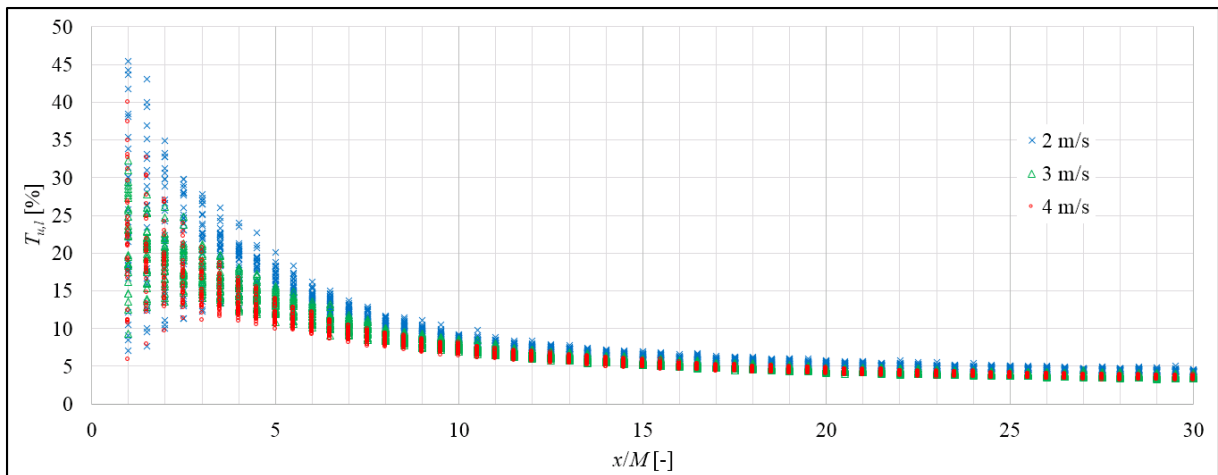
Az első méréseket a csatorna középvonalában, a rács előtti  $x/M=-2$  és a rács utáni  $x/M=8$  intervallumban végeztem el mind nyugalomban lévő, mind pedig rezgő szalagok esetén, 2,5 m/s-os átlagsebességű légáramlással. Adott légsebesség esetén a szalagok feszítésével érhető el az, hogy azok ne rezegjenek: ebben az állapotukban 15  $\mu\text{m}$ -es áramlásra merőleges vastagságuk miatt jelentéktelen befolyással bírnak az áramlásra. E méréseim során csupán az alapáramlás irányú sebességkomponenst ( $u$ ) mértem egykomponensű *CTA* szondával (55P11 típus, M3 melléklet), 2kHz-es mintavételi frekvenciával, mérési pontonként 2,5 s-os időtartamban. A passzív és az aktív üzemiállapotú rács esetén mért turbulencia-fok értékek, továbbá a rezgő szalagokról hosszú expozíciós idővel készített fénykép a 15. ábrán láthatók.



15. ábra A passzív és az aktív üzemállapotú rács keltette turbulencia-fok alakulása, továbbá a rezgő szalagokról készült hosszú expozíciós idejű felvétel.

A diagram alapján megállapítható, hogy a rács aktiválása jelentős hatással van az áramlás turbulenciájára: a rácsot követően igen kis távolságon belül ( $\sim 2M$ ) ugrásszerűen megnő a turbulencia intenzitása. Miközben passzív esetben a teljes vizsgálati tartományon belül 3%-os érték közelében, közel állandó értékű a turbulencia-fok, addig aktív esetben a maximális, 12%-os értéket is eléri a turbulencia erőssége. Ez arányait tekintve 4-szeres növekedésnek felel meg, tehát ez alapján egyértelmű, hogy a konstrukció jelentős mértékben képes növelni az alapáramlás turbulenciáját.

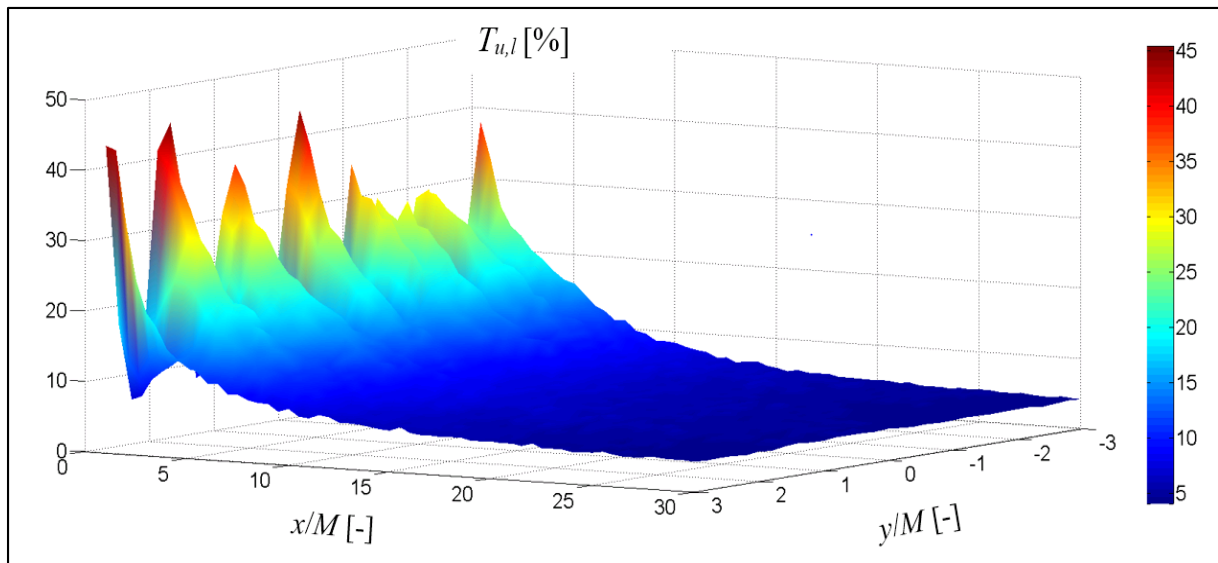
Ezen eredmény alapján további méréseket végeztem a csatorna vízszintes középvonalának ( $x$ ) középső, 150 mm ( $\equiv 6y/M$ ) széles részében,  $x=1\div 30M$  intervallumban. A megfelelően nagy felbontás miatt a rács síkjával párhuzamos  $y$  irányban  $\Delta y=0,2M$  lépésközt, míg az alapáramlás  $x$  irányában pedig  $\Delta x=0,5M$  lépésközt állítottam be. E méréseimet aktív ráccsal,  $U_{ref}=2$  m/s, 3 m/s, 4 m/s-os sebességeken végeztem el. A síkbeli mérésből számított lokális turbulencia-fok ( $T_{u,l}$ ) értékeket mutatja be a 16. ábra, ahol az egy-egy,  $x$  tengelyen mért távolsághoz tartozó vízszintes vonalban számolt adatok lettek feltüntetve.



16. ábra A vízszintes középsíkban mért lokális turbulencia-fok értékek a rácstól mért dimenzióatlan távolság függvényében. Jelmagyarázat: lásd a diagramon.

A 16. ábrán megfigyelhető, hogy mindhárom vizsgált sebesség esetén igen jelentős mértékben szórnak az értékek a rácshoz közel, aminek maga a rezgő rács az oka: az éppen egy-egy szalag között mért értékek jóval kisebbek (lásd 15. ábra), mint éppen a szalaggal egyvonalban számított eredmények. Emellett az is látható, hogy a legkisebb vizsgált sebesség esetén adódtak a legnagyobb turbulencia-fok értékek. Amennyiben a vízszintes középsíkban

mért értékeket egy háromdimenziós koordináta-rendszerben jelenítjük meg, sokkal szemléletesebb képet kaphatunk a turbulencia-fok térbeli eloszlásáról. A 2 m/s-os átlagsebesség esetén mért, lokális turbulencia-fok ( $T_{u,l}$ ) értékek mérési síkban vizsgált eloszlását mutatja be a 17. ábra.



17. ábra A lokális turbulencia-fok alakulása a csatorna vízszintes középsíkjában, rezgő szalagok után,  $U_{ref}=2$  m/s esetén.

Az ábrán megfigyelhető, hogy a szalagok közvetlen környezetében (kicsiny  $x/M$  távolságok esetén) jelentős a turbulencia-fok szórása, amely szórás a rácstól távolodva folyamatosan csökken, s az  $x/M > 10$  esetén már közel homogénnek tekinthető az adott távolságbeli turbulencia-fok eloszlása (lásd 16. ábrát is). A korábban bemutatott szakirodalmak alapján (Roach, 1987; Djenidi & Tardu, 2012; Djenidi et al., 2013) éppen ebből az okból is célszerű legalább  $10M$  távolságtól vizsgálni a turbulenciát, hiszen minimum ekkora távolság szükséges ahhoz, hogy homogén eloszlásúnak tekinthessük az áramlást. Továbbá a rács közelében akár negatív alapáramlás irányú sebességkomponensek is megjelenhetnek, amelyek miatt a hődrótos mérés eredményei jelentősebb hibákat tartalmazhatnak (Krogstad, 2012). Ahogy az látható is,  $x=10M$  távolságtól már igen szűk sávban mozognak a turbulencia-fok értékek adott távolság esetén. Továbbá jól látható az átlagértékek szigorúan monoton csökkenése is a távolsággal együtt, ami a rácscok által létrehozott elhaló turbulenciának a jele. E megállapításokon túl az is megfigyelhető, hogy nagyobb sebességértékekhez rendre kisebb értékű turbulencia-fokok tartoznak. Ennek magyarázata a turbulencia-fok definíciójában kereshető.

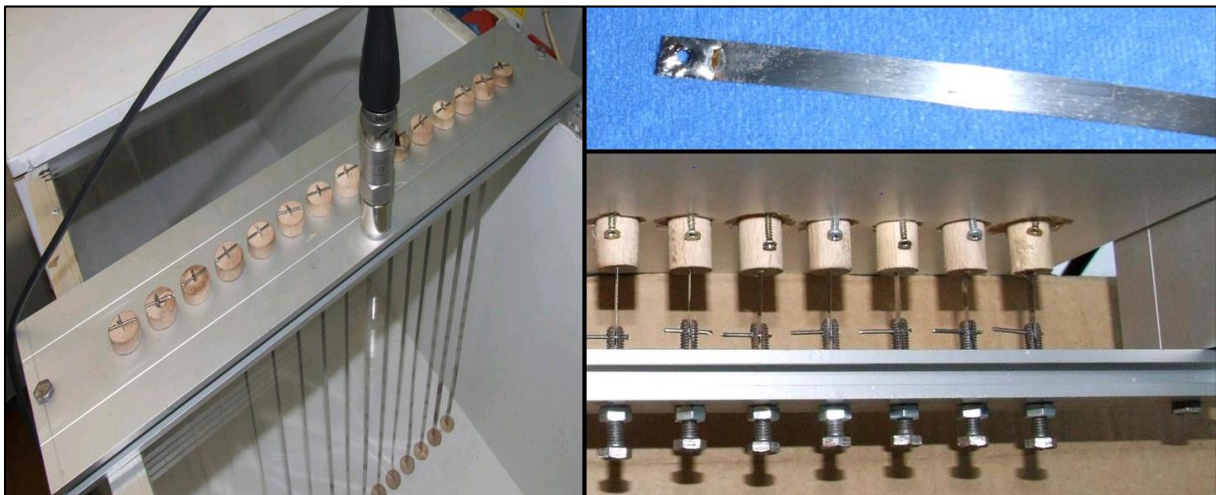
## 7.2. Acélszalag-rács összeállítása és vizsgálata

Mivel a műanyag szalagos rács vizsgálataival többször is előfordult az, hogy egy-egy szalag elszakadása miatt meg kellett ismételnem a mérést, továbbá a bemutatottaktól nagyobb áramlási sebességeken (5-6 m/s) szintén több esetben elszakadtak a szalagok, ezért egy olyan megoldást kellett keresnem, amely jóval megbízhatóbb működést tett lehetővé. Ebből az okból

cseréltem ki a műanyag szalagokat fémszalagokra, továbbá ezekhez megfelelő merevségű fémkeretet és feszítőszerkezetet is készítettem, amelyet magához a szélcsatornához rögzítettem.

### 7.2.1. A fémrács és a feszítőszerkezet összeállítása, szélcsatornába történő beépítése

A műanyag szalagos rácsvariáció eredményei rámutattak arra, hogy az adott dimenziókkal rendelkező konstrukció alkalmazható turbulencia generálására. Ezért a kereskedelemben kapható, hasonló méretekkel rendelkező fémszalagokat kerestem, majd szereztem be. A választásom – a már említett - a 6 mm széles, 50 $\mu$ m vastagságú, 1.1274 anyagminőségű rugóacél szalagokra esett. Ezek előnye az, hogy nagyobb áramlási sebességeken is alkalmazhatók, kopásállóak, továbbá hőállóak (esetleges ipari alkalmazás lehetősége). Mivel ezek jóval nagyobb szakítószilárdsággal rendelkeznek, ezért a megfelelő mértékű megfeszítésükhöz az előző megoldástól lényegesen merevebb feszítőszerkezet építése vált szükségessé. E szalagok beépítésénél az előző verzióánál kialakított furatok s hengeres vezetőelemek már rendelkezésre álltak, így ez esetben is  $M=25$  mm-es rácsköz adódott. Ezzel tehát szintén 15 darab szalagot tudtam a csatornába beépíteni. A megfelelően merev keretet alumínium Bosch-profilokból állítottam össze a csatornán kívül. A méretre vágott hosszúságú szalagok végein egy-egy 2 mm átmérőjű, forrasztással megerősített furatot képeztem, amelyeken keresztül csapokkal rögzíthettem azokat. A keret felső lapján mereven rögzítettem a fémszalagokat a rajtuk kialakított furatokon keresztül, az alsó elemén pedig csavaros feszítőszerkezetet állítottam össze. Ebben az esetben a csavarszárak végeit átlósan bevágtam s a bevágásra merőlegesen furatokat alakítottam ki a szalagok csappal történő rögzítéséhez. A csavarokon elhelyezett extra csavaranya szolgált az egy-egy szalag megfelelő feszességének beállítására. Az egy elkészített összeállítást s annak részeit a 18. ábra szemlélteti.

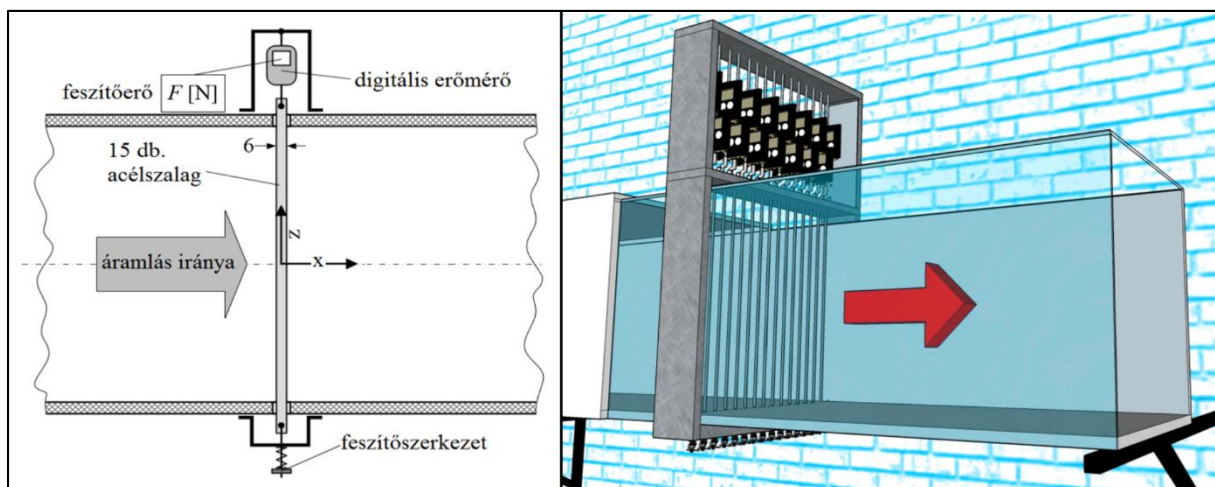


18. ábra A csatornába épített acélszalag-rács a csavaros feszítőszerkezettel s a szalagon kialakított, forrasztással megerősített furat.

Mivel ez a modell is ugyanabban a pozícióban lett beépítve a csatornába, ezért a rácsot követően 800 mm-es, azaz 32M hosszúságú mérőszakasz állt rendelkezésemre a későbbi mérésekhez.

## 7.2.2. Szisztematikus vizsgálatok elvégzése

Az összeállított acélszalag-rács után kialakuló áramlás turbulens jellemzőinek vizsgálatait több, különböző mérési összeállítás esetén végeztem el. Ezek közül az első vizsgálatokat a mérőtér középvonalában, s azzal párhuzamosan, egykomponensű mérőszonda (55P11 típus, **M3** melléklet) alkalmazásával hajtottam végre. A különböző áramlási átlagsebességeken (3 m/s, 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s) elvégzett mérések eredményeit többféle megközelítés alapján hasonlítottam össze: vizsgáltam a turbulencia elhalását a ráctól mért távolság függvényében ( $x/M=5\div 30$ ), továbbá az áramlási átlagsebességeknek a turbulens energiaspektrumra gyakorolt hatását is meghatároztam. Ezen eredményeimet a Szaszák & Szabó (2015a) tanulmányban ismertettem. Ezen túlmenően a turbulens kinetikus energia disszipációs rátájának ( $\varepsilon$ ) alakulását is megvizsgáltam, szintén különböző áramlási sebességek és ráctól mért távolságok esetén, amely vizsgálat eredményeit a Szaszák & Szabó (2015b) cikkben mutattam be. Az elvégzett vizsgálatok eredményeiből levont következtetések alapján felmerült, hogy a minél pontosabb spektrális analízishez az azokban alkalmazott mintavételi időhöz képest hosszabb mintavételi idő, továbbá nagyobb időbeli felbontás szükséges. Ezért jelen dolgozatban – a korábbi eredmények alapján – megfelelőbb mérési beállításokat alkalmazó, később elvégzett szisztematikus vizsgálatok eredményeinek bemutatására szorítkozom. Az elvégzett vizsgálatok eredményei ennél a rácsnál is bizonyították az acélszalagok alkalmazhatóságát, s ekképp az ötlet működését. Azonban problémaként felmerült, hogy az egyes szalagok különböző feszítettsége hatással lehet a keletkező turbulenciára, amit a bemutatott konstrukcióval nem lehetett vizsgálni, mivel nem volt lehetőség a feszítőerők meghatározására. Ezért a rácsot merevítő keret úgy lett átalakítva, hogy azon szalagonként 1-1 digitális erőmérő (főbb adatait lásd az **M8** mellékletben) került elhelyezésre. Ezzel a megoldással tehát szalagonként külön-külön be lehetett állítani a kívánt feszítőerőt, így egy-egy mérési esetben egymással közel megegyező feszítettségű szalagok által keltett turbulenciát vizsgálhattam. A mérőeszközökkel egybeépített szerkezet a 19. ábrán tekinthető meg.



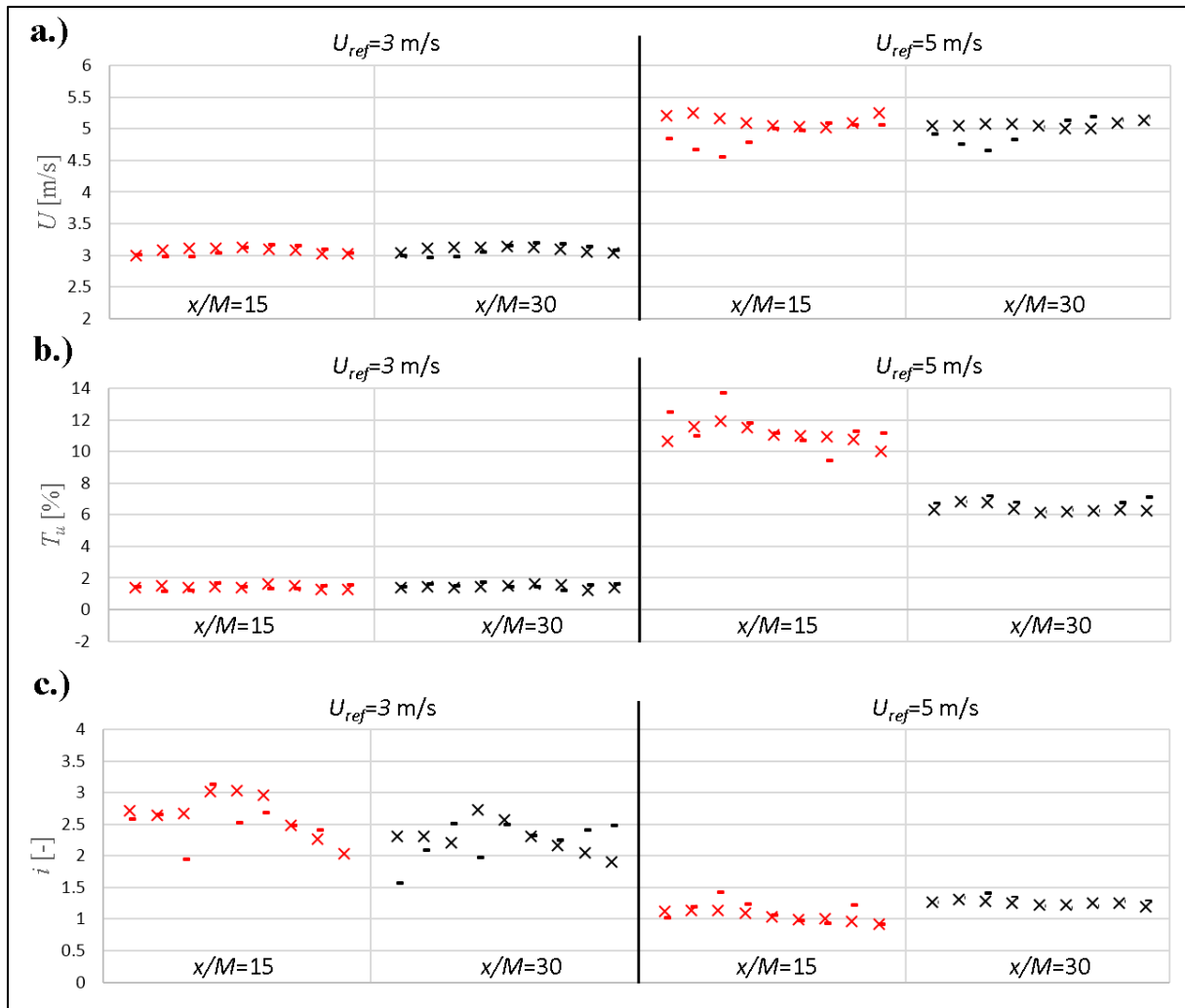
19. ábra Az erőmérőkkel ellátott rács két- és háromdimenziós rajzai.

Ezen összeállítással az első mérési sorozat három különböző feszítőerő ( $F=5$  N, 10 N, 15 N), továbbá három referenciasebesség ( $U_{ref}=4$  m/s, 5 m/s, 6 m/s) esetén lett elvégzve. A mérésekhez kétkomponensű CTA-szonda (55R51 típusú, **M3** melléklet) került alkalmazásra,

amellyel a spektrális energia-eloszlás meghatározásához 1,5 kHz-es mintavételi frekvencián mérési pontonként 60 s-on keresztül történt a mintavételezés. A mérési pontok a szélcsatorna középvonalában,  $x/M=10\div 28$  tartományban lettek definiálva. A mérések feldolgozásával igazolódott a feltételezés, miszerint a szalagok feszítőereje hatással van a turbulenciára. Ennek jelentősége főként a kisebb sebességeknél mutatkozik meg, ahol is szignifikánsan más jellegű energia-eloszlás figyelhető meg a turbulencia alapáramlás irányú, normalizált energiaspektrumában  $F=5$  N és  $F=15$  N feszítőerők esetén (Szaszák et al., 2016; Szaszák et al., 2017a,c).

Az acélszalag-rács fent említett méréseinek eredményei azt mutatták, hogy a szalagok feszítésének, és az őket megfúvó áramlás sebességének is jelentékeny hatásai vannak a kialakuló turbulenciára, ezért további, szisztematikus mérések elvégzése mellett döntöttem. Egy olyan mérésorozatot végeztem el, amely CTA technikával gyűjtött adataiból mind statisztikai (időben és térben is átlagolt) eredményeket, mind pedig a turbulencia spektrális eloszlására jellemző mennyiségeket meghatározhattam. Továbbá fontos volt megfelelő számú paraméter-variáció mérése is, hogy az egyes változók hatásait nagy biztonsággal határozhassam meg. Éppen ezért az újabb méréseket (szintén az 55R51 típusú szondával)  $F=5$  N, 10 N, 15 N, 20 N feszítések esetén, s  $U_{ref}=3$  m/s, 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s végeztem el. A méréseket a szonda sebesség- és irány-kalibrációját (lásd M9 mellékletet) követően végeztem el. A CTA mérés technika figyelembe vett hibatípusaival történt hibabecslés (Jørgensen, 2002) alapján 3,03%-os relatív hibát kalkuláltam, amelynek számítási részleteit az M10 melléklet tartalmazza. Fontos továbbá megjegyezni, hogy összesen öt mérési esetben egyáltalán nem rezegtek a szalagok, azokat nem tudta az áramlás rezgésbe hozni. 3 m/s-os sebesség esetén egyik feszítésnél sem rezegtek a szalagok (4 eset), továbbá a 10N-os feszítés mellett a 4 m/s-os sebességű beállítás esetén is teljesen mozdulatlanok maradtak. Ugyancsak 4 m/s-os sebességnél a többi feszítés esetén sem rezgett az összes szalag. Ez a tény nyilvánvalóan hatással volt az eredményekre, viszont a mérések megismétlése (és a sebesség újbóli beállítása) esetén szintén voltak nyugalomban maradó szalagok. A továbbiakban ezért az  $U_{ref}=3$  m/s sebességhez tartozó eredményeket és az  $U_{ref}=4$  m/s és  $F=5$  N feszítőerőhöz tartozókat „passzív üzemiállapotúnak” nevezem, s ezeket hasonlítom össze a  $U_{ref}=4$  m/s, 5 m/s, 6 m/s sebességekhez tartozó „aktív állapotú” esetekkel. A továbbiakban bemutatásra kerülő passzív és aktív eseteknek megfelelő eredmények között szignifikáns különbségek figyelhetők meg, így azok egyértelműen megkülönböztethetők lesznek. Ekkor már a korábbi mérésekhez képest jóval nagyobb, 20 kHz-es mintavételi frekvenciával (továbbá 10 kHz-es aluláteresztő szűrővel), mérési pontonként 60 s-ig gyűjtöttem az adatokat a csatorna középvonalában,  $x/M=10-15-20-25-30$  pozíciókban. Ezen túlmenően a ráccsal párhuzamos középvonalakban is történtek mérések az áramlás homogenitásának vizsgálata céljából. A mérési adatokat dedikált MATLAB script-ekkel dolgoztam fel, így eredményként számos, a 4. fejezetben részletezett, turbulenciára jellemző mennyiséget határoztam meg, amelyek segítségével össze tudtam hasonlítani a különböző beállításokkal kapott turbulencia-jellemzőket (Szaszák et al., 2016; Szaszák et al., 2017a,b,c,d).

A rács síkjával párhuzamosan, vízszintes ( $y$ ) és függőleges ( $z$ ) középvonalakban vizsgáltam az áramlás homogenitását. E méréseimet az  $x/M=15$  és  $x/M=30$  távolságokban,  $U_{ref}=3$  m/s (nyugalomban lévő szalagok) és  $U_{ref}=5$  m/s (rezgő szalagok) esetén vizsgáltam a középső,  $8M$  szélességű részben. Az adatokból számított pontbeli átlagsebesség ( $U$ ), a turbulencia-fok ( $T_u$ ) és az izotrópia-arány eloszlását szemlélteti a 20. ábra a.) b.) és c.) része.



20. ábra A rács síkjával párhuzamos vonalakban mért jellemzők  $F=20N$  feszítettségű szalagok esetén: a.) átlagsebesség; b.) turbulencia-intenzitás; c.) izotrópia-arány. Jelölés: függőleges (z) vonalban számított értékek: x; vízszintes (y) vonalban kapott eredmények: -.

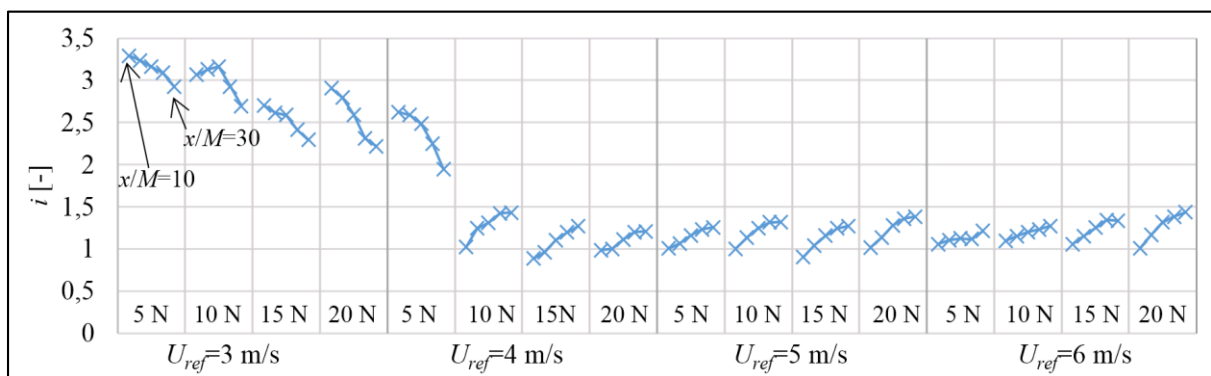
A 20. ábra mindhárom diagramja (a.), b.), c.)) két-két részre osztható a beállított referenciasebesség alapján. Az egyes részegységek egy-egy oszlopa pedig a ráctól mért távolság szerinti eredményeket tartalmazza. A 20 a.) ábra alapján megállapítható, hogy miközben passzív üzemű rács esetén a sebességértékek közel megegyezően kis szórásúak (azaz igen szűk sávban mozognak), addig aktív esetben (azaz  $U_{ref}=5 \text{ m/s}$  esetén) a szórás valamelyest nagyobb értékű. Főként a vízszintes (y) irányban számított értékek szórnak jelentősen s aszimmetrikusan, s ez a tendencia nem csökken számottevően a ráctól mért távolsággal sem: a legnagyobb relatív eltérés nagysága 7%-os. Annak tényét, hogy a rács hatására csökken az áramlás homogenitása, már számos szakirodalom tárgyalta. Főként légsugaras rácsoknál számoltak be jelentős inhomogenitásról: Liu et al. (1971) cikkükben 10% körüli értéket publikáltak, Mathieu & Alcaraz (1965) pedig 15%-ról számolt be. A 20 b.) ábra egyértelműen igazolja, hogy az aktív üzemállapotú rács jelentősen nagyobb mértékű turbulenciát állít elő, mint passzív üzemben. Azonban itt is megfigyelhető, hogy – miközben passzív esetben közel állandó értékű – aktív üzemű rács esetén szélesebb intervallumban mozognak az értékek, habár  $x=30M$  távolságban már szűkebb ez a tartomány. Továbbá fontos észrevenni azt, hogy aktív esetben a két vizsgált távolság értékei jelentősen eltérnek, ami a rács által keltett turbulencia

elhaló jellegéből adódik. A 20. c.) ábrán látható tendencia szerint az aktív üzemű rács jelentősen javítja az izotrópia-arányt, hiszen esetében egységnyihez jóval közelebbi értékek adódnak. Itt azonban meg kell azt jegyezni, hogy az izotrópia-arány számításának alapjai a szórásértékek, amelyek értékei passzív esetben jóval kisebbek, így a velük való kalkuláció nagyobb relatív hibát eredményez.

A rácesturbulencia jellemzésére a fellelt szakirodalom alapján leginkább a ráctól mért távolságot, mint független változót alkalmazzák, s ennek függvényében vizsgálják az egyes mennyiségek alakulását. A következőkben én is a szélcsatorna középvezetékében mért mennyiségeket fogom ismertetni. A legtöbb turbulens paraméter összehasonlítása a szalag-rács passzív és aktív állapota között nem lehetséges, mert – eltérően a légsugaras ráctól – a szalag-rács passzív állapotában nem tekinthető konvencionális rácsnak, mivel ekkor elhanyagolható a szalagok áramlásra merőleges kiterjedése. Éppen ezért, ilyenkor a mért turbulencia magára a szélcsatornára jellemző, nem pedig a rácsra.

A csatorna középvezetékében az egyes mérési esetek vizsgálatakor a sebességértékek közel állandó értékűre adódtak a vizsgált  $x/M=10\div30$  tartományban. Az  $U_{ref}=6$  m/s-os beállítás kivételével minden esetben 3%-tól kisebb volt a legnagyobb mértékű relatív hiba; a legnagyobb sebességen  $F=20$  N-os feszítettségnél 8%-os maximális relatív eltérést kalkuláltam a rácsokhoz legközelebbi mérőpontban.

A következőkben eredményeimet diagramokkal szemléltetem. A diagramok egyes oszlopai az adott referenciasebességeknek felelnek meg, s egy-egy oszlopon belül rendre az  $F=5\text{--}10\text{--}15\text{--}20$  N erőkhöz tartozó értékek láthatók (vonalakkal összekötött pontok). Minden adatsor első pontja az  $x=10M$ , utolsó pontja pedig az  $x=30M$  távolságnak felel meg. Ilyen módon könnyen összehasonlíthatók a vizsgált mérési esetek eredményei. A 21. ábrán az izotrópia-arány ( $i$ ) alakulása tekinthető meg.



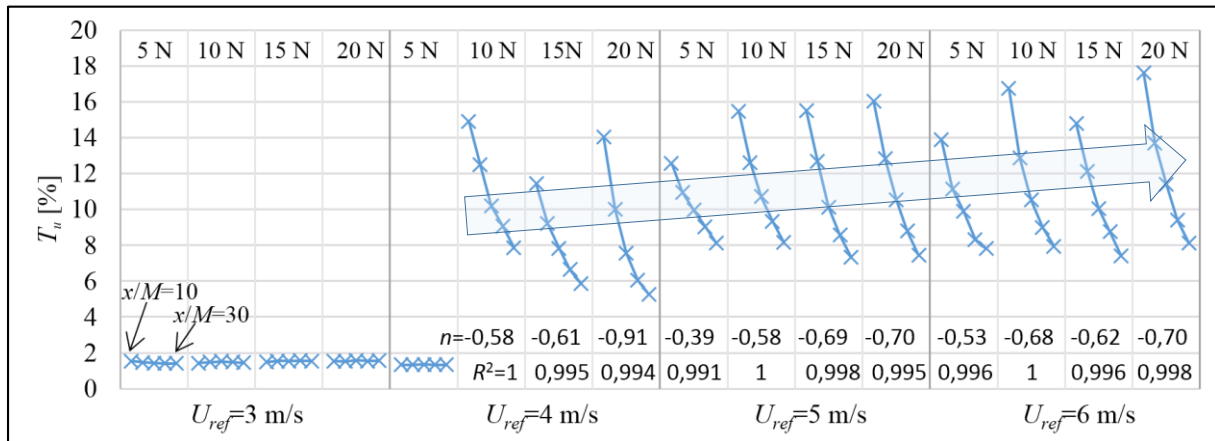
21. ábra Izotrópia-arány ( $i$ ) a vizsgált mérési esetekben, a ráctól mért  $x/M$  távolság függvényében.

Elsőként szembevetendő lehet, hogy passzív esetekben ( $U_{ref}=3$  m/s) messze nem izotróp az áramlás (hasonlóan a 20. c.) ábrához). Ekkor ugyanis – feltételezésem szerint – a rács áramlásra gyakorolt hatása éppen olyan (alapáramlással párhuzamos síkú lemezlapok), hogy az alapáramlásra merőleges, vízszintes irányú ( $y$ ) sebességkomponens ingadozásokat ( $v'(t)$ ) csökkenti, így az izotrópia-arány ( $i$ ) nagyobb értékű lesz a rács közelében. Ezzel szemben aktív esetben vélhetően éppen ellenkező folyamat játszódik le: a rezgő szalagok nagymértékben megnövelik az alapáramlásra merőleges, vízszintes irányú ( $y$ ) sebességkomponens szórásértékét ( $v_{sd}$ ), így egy nagyobb értékkel lesz elosztva az  $u_{sd}$  komponens. Mivel a lokálisan megnövekedett értékű  $v_{sd}$  az áramlással tovahaladva folyamatosan csökken, ezért fordulhat elő



a 21. ábrán is megfigyelhető, a távolsággal együtt növekvő izotrópia-arány. Ez a tendencia éppen, hogy ellenkező irányú a szakirodalomban a passzív és a hagyományos aktív rácsok esetén publikáltakhoz viszonyítva, hiszen a vizsgált, rezgésbe hozott szalag-rács esetében más hatásmechanizmusok érvényesülnek, mint a hagyományos rácsok esetén. Azokban az esetekben ugyanis a rácsot követően egy egységnyitől nagyobb izotrópia-érték adódik, amely a ráctól való távolsággal együtt monoton csökken, s aszimptotikusan közelíti az egységnyi értéket (Gad-el-Hak & Corrsin, 1974; Makita, 1991; Kang et al., 2003).

Az alapáramlás irányú (globális, azaz a referenciasebességgel képzett) turbulencia-intenzitás ( $T_u$ ) a 22. ábrán figyelhető meg.

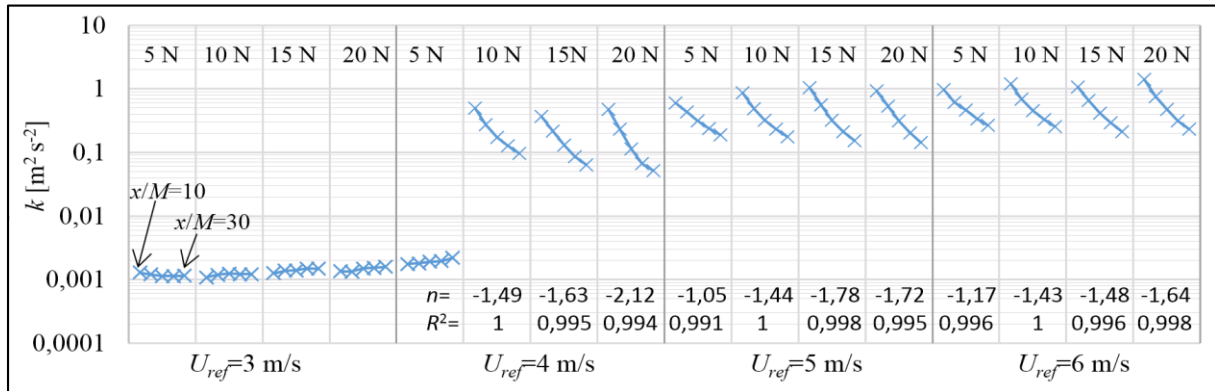


22. ábra Alapáramlás irányú turbulencia-fok ( $T_u$ ) alakulása az egyes mérési esetekben, a ráctól mért  $x/M$  távolság függvényében. Az aktív állapotokhoz tartozó adatpontokra illeszthető hatványfüggvények hatványkitevői ( $n$ ) és a korrelációs együtthatók négyzetek ( $R^2$ ) az ábrán feltüntetve.

A diagram alapján számos megállapítás tehető. Elsőként jelentős különbség figyelhető meg a nem rezgő és a rezgő esetek között: a rács aktív állapotában jelentősen nagyobb értékű turbulencia-fok adódott a teljes vizsgálati  $x/M$  tartományon. Továbbá adott feszítőerők mellett gyenge kapcsolat figyelhető meg a sebesség és a turbulencia-fok között: adott távolságban a sebesség növelésével együtt átlagosan nagyobb turbulencia-fokokat kalkuláltam (a tendencia az ábrán nyíllal jelölve). Az összetartozó adatpontokra illesztett egyenesek átlagos meredeksége 0,82 %/(m/s) értékűre adódott. Ezzel szemben az állandó sebességen történő feszítőerő-változtatás nem eredményezett egyértelmű változást. Az aktív eseteknél kapott görbék monoton csökkenőek, amely jelleg a rács turbulenciára jellemző. A szakirodalomban tárgyalt passzív rácsok esetén az alapáramlás irányú turbulencia-fok  $-5/7$ -es ( $\approx -0,71$ ) kitevőjű hatványfüggvény szerint csökken a távolsággal (Roach, 1987), amelyet az általam vizsgált rács passzív állapota esetén nem tudtam kimutatni. Ezzel szemben a rács aktív állapotában a passzív rácsokra jellemző értéktől eltérő meredekséggel csökken a turbulencia-intenzitás: az egyes esetekhez tartozó görbékre jól illeszkedő hatványfüggvények kitevői  $-0,91$ - $-0,39$  között alakultak (lásd  $R^2$  és  $n$  értékeket a 22. ábrán).

A turbulens kinetikus energia számításánál az alkalmazott kétkomponensű mérés technika korlátai miatt lokális izotrópiát kellett feltételeznem, azaz, hogy az alapáramlásra merőleges két sebességkomponens szórásértékei ( $v_{sd}$  és  $w_{sd}$ ) közel megegyezők. Mivel a kialakított, csupán függőleges irányultságú rácselemekből felépített rács a szakirodalomban tárgyalt, egymásra merőleges rácsoktól eltér, ezért a lokális izotrópia feltételezése a rács környezetében vélhetően nagyobb hibákat eredményez, hiszen a ráctól mért bizonyos távolságig a  $w_{sd}$ -hez képest

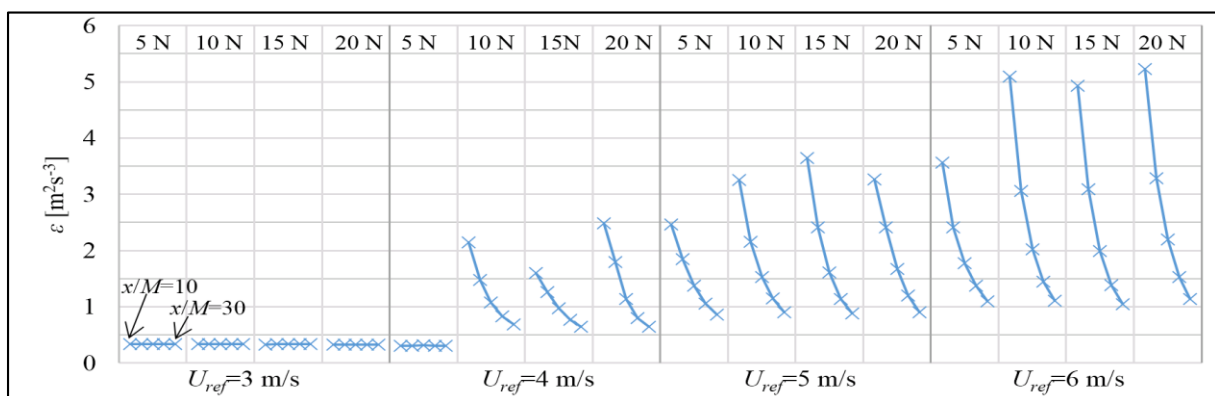
megnövekedett  $v_{sd}$  szórással történő számolással túlbecsült turbulencia-eredmények várhatók. Az így létrehozott anizotrópiát egy, a vizsgált rácselemekre merőlegesen elhelyezett második szalag-rács csökkenthetné, azonban ennek kialakítására nem került sor jelen dolgozat elkészítéséig. Tehát az ilyen módon (lokális izotrópia feltételezésével) számított turbulens kinetikus energia ( $k$ ) értékek a 23. ábrán láthatók. Az ábra a turbulencia-fokhoz hasonló jellegű (ami a számítási összefüggésből adódik), azonban az összefüggés ez esetben tartalmazza a keresztirányú szórásértéket ( $v_{sd}$ ) is.



23. ábra A turbulens kinetikus energia ( $k$ ) alakulása az egyes mérési esetekben (lin-log skála) a rácstól mért  $x/M$  távolság függvényében. Az aktív állapotokhoz tartozó adatpontokra illeszthető hatványfüggvények hatványkitevői ( $n$ ) és a korrelációs együtthatók négyzetei ( $R^2$ ) az ábrán feltüntetve.

Megfigyelhető, hogy a passzív esetekhez képest legalább két nagyságrenddel nagyobb értékek adódnak aktív állapot esetén, tehát az aktív üzemű rács számottevően képes növelni az áramlás turbulens kinetikus energiáját. Emellett az értékek közel monoton módon növekednek az áramlási sebességgel is, ami a sebességkomponensek szórásának növekedésére utal. Az adott sebességekhez tartozó különböző feszítőerőkkel kapott értékek között nem látható jelentős különbség, azonban a görbék meredeksége változik a feszítőerővel. Az ábra aktív eseteihez tartozó adatpontokra illesztett regressziós görbék (jól korreláló hatványfüggvények) hatványkitevői (23. ábra) alapján elmondható, hogy – egy esettől eltekintve – adott sebességen a feszítőerő növelése meredekebb görbét eredményezett, azaz a turbulens kinetikus energia térben intenzívebben csökkent.

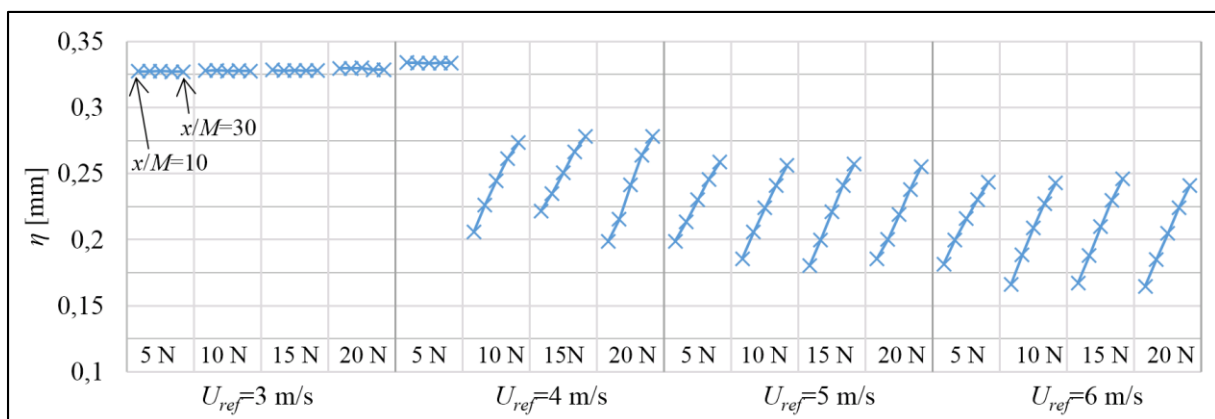
Ezen észrevételt a disszipációs rátára ( $\epsilon$ ) kapott eredmények is megerősítették, amelyeket a 24. ábra szemléltet.



24. ábra A turbulens kinetikus energia disszipációs rátájának ( $\epsilon$ ) értékei az egyes mérési esetekben, a rácstól mért  $x/M$  távolság függvényében.

A disszipációs ráta értékek csakúgy, mint a turbulens kinetikus energia esetében, jelentősen megnőnek a rács aktív állapota esetén. Mivel passzív esetben igen gyenge a turbulencia, s lényegében a rács ekkor nincs rá hatással, ezért a disszipációs ráta értéke is közelíti a zérust. Azonban aktív esetben a rács által keltett igen erős energiájú turbulencia a szakirodalmi eredményekkel összhangban (pl. Kang et al., 2003) nagymértékben hal el a rács közelében, azonban ennek rátája folyamatosan csökken a távolság növekedésével. Mivel  $\varepsilon$  a turbulens kinetikus energia idő szerinti megváltozásának negáltjából adódik (lásd 4.12 összefüggés), ezért a kapott értékeknek hasonló tendenciát kell mutatniuk (s mutatnak is), mint a turbulens kinetikus energia ( $k$ ) esetén, hiszen a pozíció (megtett út) és az idő között az átlagsebesség teremt – lineáris – kapcsolatot.

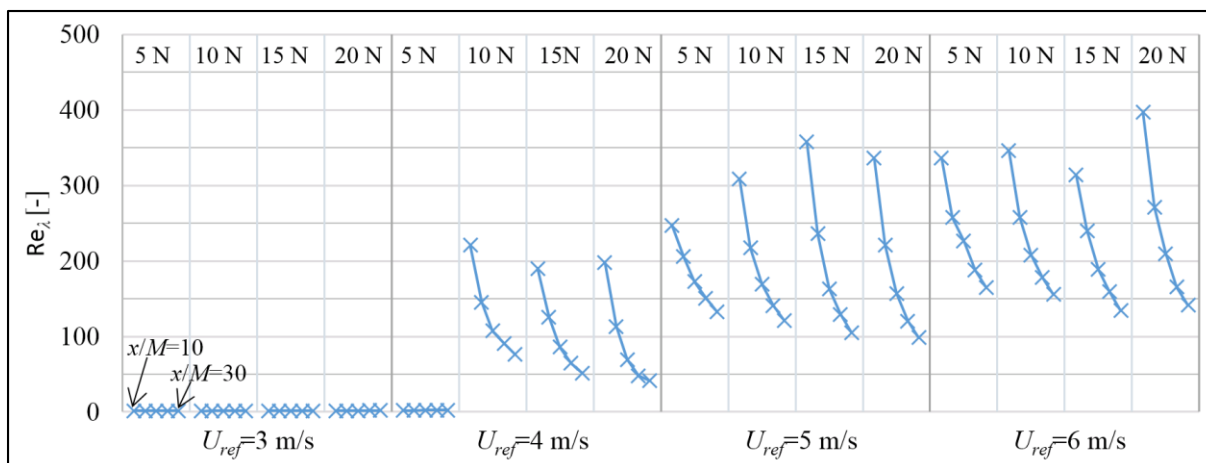
Az áramlásban jelenlévő legkisebb örvények mérete Kolmogorov (1890) szerint csupán két paramétertől,  $\varepsilon$ -tól és  $\nu$ -tól függ. A Kolmogorov hosszléptékre ( $\eta$ ) passzív és az aktív esetekben kapott értékeket a 25. ábra szemlélteti.



25. ábra A Kolmogorov-hosszlépték ( $\eta$ ) alakulása a vizsgált passzív és aktív esetekben, a rácsból mért  $x/M$  távolság függvényében.

Mivel a kiértékelés során állandó értékű kinematikai viszkozitással számoltam, ezért a Kolmogorov-hosszlépték változása csupán a disszipációs ráta függvénye. Megfigyelhető, hogy passzív esetben közel állandó értékek adódtak, s ezek nagyobbak, mint az aktív esetben számított értékek. Passzív rácsoknál a szakirodalomban is nagyobb értékeket találtam: Comte-Bellot & Corrsin (1966)  $\eta=0,29$  mm-es értéket, Makita (1991) pedig  $\eta=0,65$  mm-t publikált. Aktív rácsok esetén rendre kisebb értékek adódnak: például Makita (1991) a rács aktiválása után  $\eta=0,21$ -es értéket tett közzé. Ezeken túlmenően megfigyelhető, hogy a sebesség növelésével aktív esetekben  $\eta$  csökkenő tendenciát mutat. Ez szintén többek által igazolt jelenség (Gad-el-Hak & Corrsin, 1974; Kurian & Fransson, 2009; Larssen & Devenport, 2002).

A turbulencia leírásának további fontos skalár paramétere a Taylor-Reynolds szám ( $Re_\lambda$ ). Ez a mennyiség, ahogy azt már korábban kifejtettem – hasonlóan a klasszikus értelemben vett Reynolds-számhoz – a tehetetlenségi és a súrlódási erők arányát fejezi ki. Ennek jellemző értéke passzív rácsok esetében száz-as nagyságrendben mozog, de erősen függ a szélcsatorna méretétől s az áramlás sebességétől is. A szalag-rács esetében mért Taylor-Reynolds szám értékeket a 26. ábra szemlélteti.

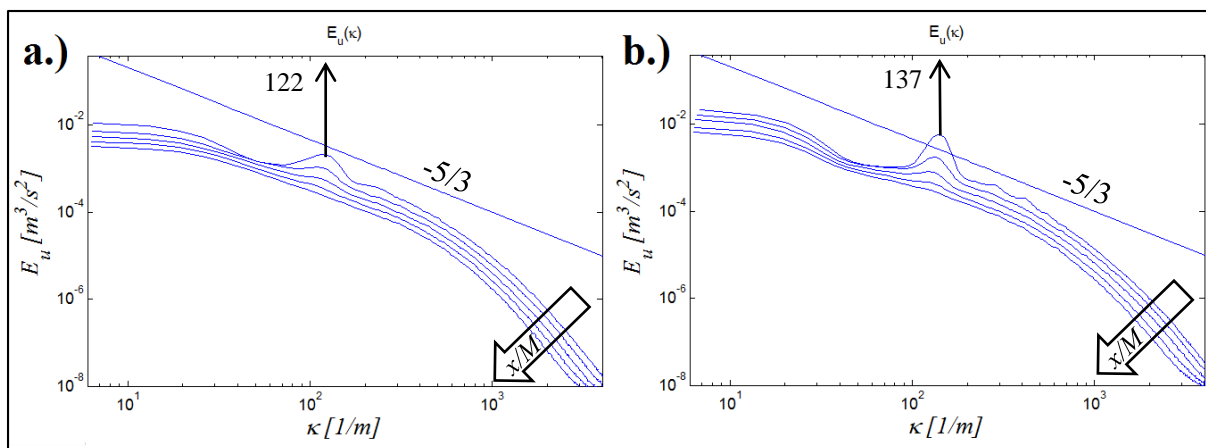


26. ábra A Taylor-Reynolds szám ( $Re_\lambda$ ) alakulása az egyes mérési esetekben, a rácstól mért  $x/M$  távolság függvényében.

Az ábrán megfigyelhető, hogy a passzív állapot esetén (főként a kis értékű turbulens kinetikus energia miatt) közel zérus értékek adódtak. Ezzel szemben rezgő szalagok esetén jelentős növekedés látható, amely (egy adatsor-pár kivételével) az átlagsebességgel együtt növekvő tendenciát mutat. Ez szintén összhangban áll a turbulens kinetikus energia alakulásával. Tehát összességében elmondható, hogy az aktív ráccsal sikerült jelentősen növelni a turbulenciát: igen alacsony sebességen, egy kisméretű szélcsatornában több esetben is néhány százás értékű Taylor-Reynolds számú turbulens áramlást sikerült elérni az aktív ráccsal.

A turbulenciát leíró skaláris mennyiségek mellett a különböző léptékű turbulens örvények energiájának spektrális eloszlását is vizsgáltam. Ennek során meghatároztam – a szakirodalom által preferált, alapáramlás irányú pillanatnyi sebességkomponens ( $u$ ) fluktuációjából adódó – spektrális energiasűrűségeket ( $E_u(\kappa)$ ), azaz a turbulenciára jellemző energiaspektrumokat. Ezekhez – ahogy azt már bemutattam – a *MATLAB psd* függvényét alkalmaztam. A szalag-rács esetében csupán az aktív állapotokhoz tartozó spektrumokat határoztam meg, mivel passzív esetben a kismértékű turbulens kinetikus energia (23. ábra) miatt a spektrális eloszlás jelentős relatív hibát tartalmazott. Az aktív esetekhez tartozó spektrumok alapján azonban számos, a turbulencia leírása szempontjából igen fontos észrevételt tehetünk, amelyek közül többet a Szaszák et al., 2016; Szaszák et al., 2017a,c,d publikációkban is kifejtettünk, s e dolgozatban is részletezek.

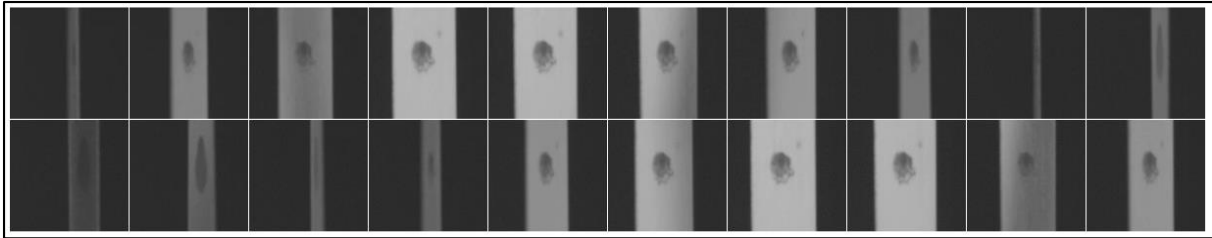
A 27. ábrán látható diagramok állandó,  $U_{ref}=5$  m/s és  $F=10$  N (a.), továbbá  $U_{ref}=6$  m/s és  $F=20$  N (b.) feszítőerő esetén szemléltetik a spektrális energia-eloszlást ( $E_u(\kappa)$ ) a rácstól mért  $x/M=10, 15, 20, 25, 30$  távolságokban.



27. ábra Alapáramlás irányú energiaspektrumok, és a  $-5/3$ -os meredekségű hatványfüggvényt szemléltető görbék. a.)  $U_{ref}=5$  m/s és  $F=10$  N feszítőerő esetén; b.)  $U_{ref}=6$  m/s és  $F=20$  N feszítőerő esetén. Mindkét esetben  $x/M=10-15-20-25-30$  helyen, a középvonalonban mért eredmények. A lokális amplitúdó-csúcsokhoz tartozó hullámszám értékek az ábrán feltüntetve.

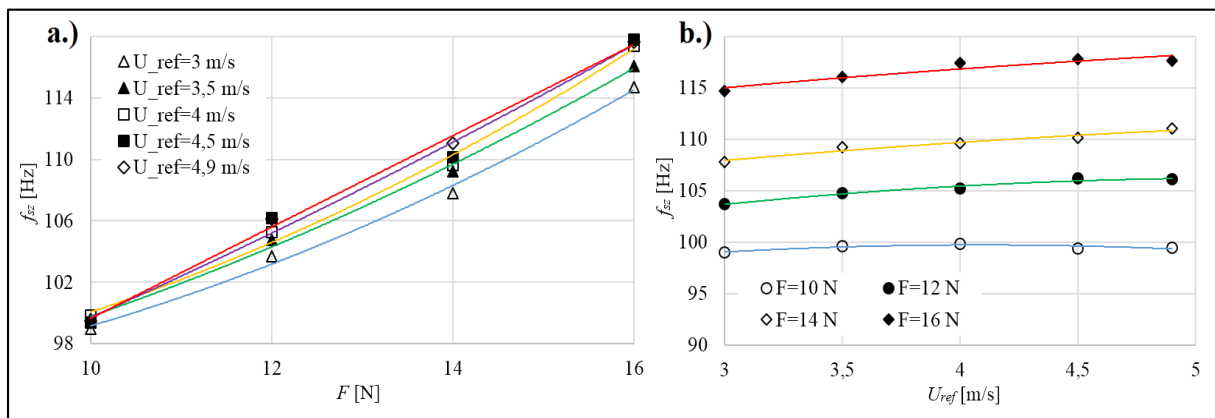
Mindkét diagram esetében megfigyelhető, hogy hasonló jellegűek a megfelelő görbék: a rácshoz közel mindkét mérési esetben jóval nagyobb a görbék alatti terület, amely a távolsággal együtt monoton csökken. Ennek oka az, hogy definíció szerint a görbe alatti terület arányos a turbulens kinetikus energiával, s a rácsturbulencia elhaló turbulencia, a távolsággal együtt csökken (lásd: 23. ábra). Továbbá jól észrevehető, hogy mindkét bemutatott esetben a rácshoz közeli görbék lokális maximummal rendelkeznek, amely maximumok a távolsággal együtt eltűnnek. Mindkét diagramon a rácstól mért nagyobb távolságok esetén megfigyelhető egy, az elméleti  $-5/3$ -os kitevőjű hatványfüggvénnyel közel párhuzamos szakasz (log-log skála!), amelyet Kolmogorov alapján tehetetlenségi tartománynak nevezünk, s minden ún. kialakult turbulencia esetén kimutatható ennek jelenléte. Azonban a kisebb távolsághoz tartó görbék esetén ezt a szakaszt megtöri a lokális maximum környezetében kialakuló púp, amelyhez tartozó hullámszám ( $\kappa$ ) értéket a két diagramon jelöltem. Látható, hogy a lokális maximumhoz tartozó hullámszám nem változik számottevően a különböző  $x/M$  pozíciókhoz tartozó görbék esetén. A lokális maximumok megjelenésének fontos szerepe az, hogy a rezgő szalag által keltett turbulenciában a vizsgált  $x/M$  tartomány nagy részén jelen van egy olyan hullámszám (örvényméret) tartomány, amely az elméleti tendenciához képest (8. ábra) nagyobb energiával rendelkezik.

Így jogosan merült fel az a gondolat, hogy ez a jelenség a rács rezgésével szoros összefüggésben állhat. Ezért olyan vizsgálatot is el kellett végezni, amelyek segítségével meghatározhattam az aktív szalagok rezgésének frekvenciáját, továbbá azt, hogy ez milyen kapcsolatban áll a feszítőerővel és az áramlási átlagsebességgel. E vizsgálatokhoz a nagysebességű kamerát alkalmaztam (M6 melléklet): adott beállítások esetén képsorozatot ( $1280 \times 240$  pixel,  $f_k=4489$  Hz) rögzítettem a rezgő szalagokról (négy szomszédos szalagot vizsgáltam), amely képsorokat aztán a *MATLAB*-ban általam erre a célra készített script segítségével dolgoztam fel (a rezgő szalagok okozta periodikus jellegű fényerősség-változáson alapult a feldolgozás). Az egyik vizsgált rezgő szalag egy rövid szeletének időben egymást követő pillanatképeit mutatja a 28. ábra, amely alapján egyértelműen látható, hogy a rezgőmozgás a szalag hossz tengelye körüli periodikus elcsavarodás.



28. ábra Az egyik rezgő szalag kamerával rögzített, időben egymást követő pillanatképei (olvasási rendben).

A *MATLAB* script segítségével eredményként egy-egy videó feldolgozásából megkaptam a négy, vizsgált szalag rezgési frekvenciáját. Összesen öt különböző referenciasebességen ( $U_{ref}=3-3,5-4-4,5-4,9$  m/s) és négy feszítőerő esetén ( $F=10-12-14-16$  N) készítettem felvételeket. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy az azonos névleges feszítettséű szalagok közel azonos frekvencián rezegnek egy-egy mérési esetben. Az egyes esetek szórásai csupán  $0\div 3$  Hz intervallumban mozogtak, miközben az egy-egy méréshez tartozó átlagos frekvencia  $99\div 118$  Hz tartományban helyezkedett el. A kapott átlagos frekvenciaértékeket mind a feszítőerő (a.), mind pedig a referenciasebesség (b.) függvényében szemlélteti a 29. ábra.



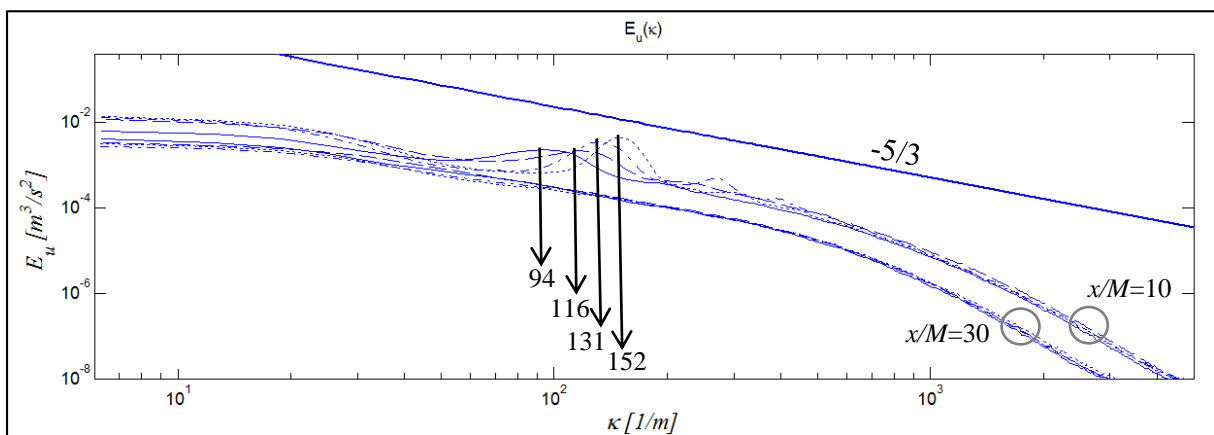
29. ábra A szalagok rezgési frekvenciái ( $f_{sz}$ ): a.) a rezgési frekvencia a feszítőerő függvényében, állandó  $U_{ref}$  esetén; b.) a rezgési frekvencia a referenciasebesség függvényében, állandó  $F$  esetén. Jelmagyarázat a diagramokon található.

A 29. ábra alapján megállapítható, hogy a szalagok rezgési frekvenciája mind az áramlás átlagsebességétől, mind pedig a feszítőerő nagyságától függ. Látható, hogy a vizsgált feszítőerő-tartományban az erővel együtt jelentős mértékben, monoton növekedett  $f_{sz}$  minden referenciasebesség esetén (29 a.) ábra), tehát egy erős kapcsolat mutatható ki a két mennyiség között. Emellett a 29 b.) diagram alapján is elmondható, hogy adott feszítőerő esetén az átlagsebesség növekedése hatására kis mértékben a frekvencia is növekszik, habár ez a kapcsolat jóval gyengébbnek mondható ( $F=10$  N esetén nem is mutatható ki tendencia).

Az előzőekben bemutatott, a rezgő szalagok frekvenciájának a feszítőerőtől és az áramlási átlagsebességtől való függésének ismerete alapján már további megállapítások tehetők az energiadiagramok (27. ábra) tekintetében. A 27 a.) diagramon a lokális maximum  $\kappa=122$  1/m értéknél adódott. Ahhoz, hogy ezt összevethessük a szalagok rezgési frekvenciájával, a hullámszám definícióját ( $\kappa = 2\pi f/U_{ref}$ , 4.14 összefüggés) kell felhasználnunk. Ezt átalakítva kapjuk az  $f=\kappa U_{ref}/(2\pi)$  összefüggést. Ez alapján a  $\kappa=122$  1/m-es érték  $U_{ref}=5$  m/s esetén  $f=97,1$

H<sub>z</sub>-es frekvenciának felel meg. Ez az érték azonban igen közel esik a szalagok rezgési frekvenciáját bemutató 29. a.) ábrán az  $U_{ref}=4,9$  m/s és  $F=10$  N esetén számolt  $\approx 99$  Hz-es értékhez. A jobb oldali energiadiagramon kapott lokális csúcs értéke ( $\kappa=137$  1/m) alapján  $f=130,8$  Hz adódik. Ezt azonban a rezgésvizsgálat eredményeivel nem lehet egzaktul összevetni, mivel a rezgésvizsgálat esetén nem volt vizsgálva sem ekkora feszítőerő, sem pedig ekkora áramlási sebesség. Azonban a 29. a.) diagram jellege alapján, annak extrapolációjával hasonló érték adódik: 4,9 m/s és 20 N-os feszítőerő esetén 129,3 Hz-es extrapolált értéket számoltam. Így tehát megállapítható, hogy rezgő szalagok esetén a kialakult turbulencia energiaspektrumában látható lokális maximum a szalagok rezgési frekvenciájának a következménye.

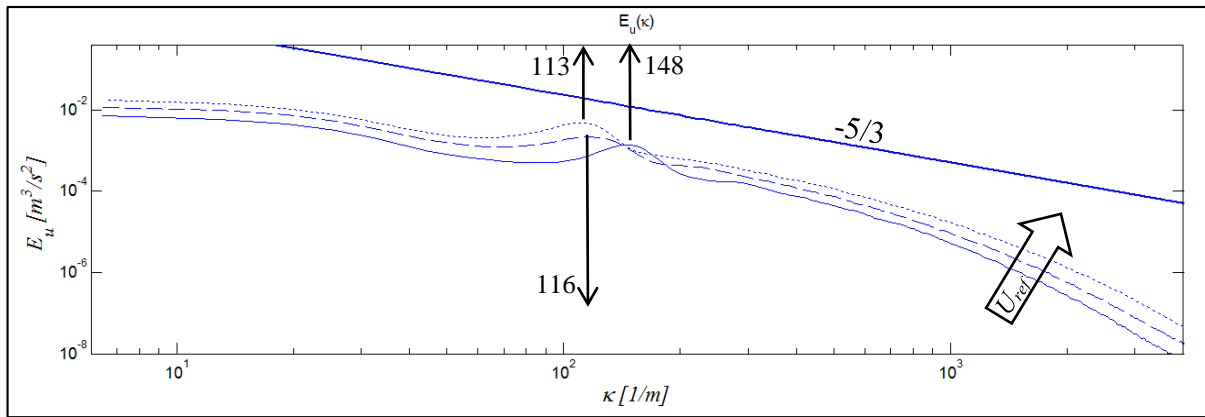
Folytatva a turbulencia spektrális elemzését, a 30. ábra egyrészt a feszítőerőnek a spektrumra gyakorolt hatását, másrészt pedig a távolság hatását kívánja bemutatni  $U_{ref}=5$  m/s esetén.



30. ábra Alapáramlás irányú energiaspektrumok  $U_{ref}=5$  m/s esetén  $x/M=10$  és  $x/M=30$  pozíciókban, továbbá a  $-5/3$ -os meredekségű hatványfüggvényt szemléltető görbe. Ez esetben a feszítőerő volt variálva. Jelmagyarázat: '—'  $F=5$  N; '---'  $F=10$  N; '· · · ·'  $F=15$  N; '- · - ·'  $F=20$  N. A lokális amplitúdó-csúcsokhoz tartozó hullámszám értékek az ábrán feltüntetve.

Az ábra alapján megállapítható, hogy a feszítés erejétől függetlenül  $x/M=30$  távolságban már elenyésző az egyes esetek közötti különbség, s itt mind a négy variációnál kialakul az elméleti  $-5/3$ -os görbével párhuzamos szakasz. Ettől eltérően azonban  $x/M=10$  esetén látható, hogy nem alakul ki párhuzamos görbe-rész, aminek oka a megjelenő púp lehet. A lokális maximumok mindegyik feszítőerő esetén máshol jelennek meg: nagyobb feszítőerő nagyobb hullámszámnál megjelenő csúcsot okoz. Ebben az esetben is összevethetők a megjelenő csúcsokhoz tartozó hullámszámokból számolt frekvenciák a szalagok megfelelő esethez tartozó rezgési frekvenciáival. A hullámszámokból kalkulált frekvenciák rendre:  $f=75$ ; 92; 104; 121 Hz. A 4,9 m/s sebességen végzett rezgésmérésből  $F=10$  N esetén 99,5 Hz;  $F=14$  N esetén pedig 111 Hz adódott, amely értékek jellemzően közel vannak a spektrumból számított adatokhoz. A különbség okozója feltételezhetően a mérések esetén beállított eltérő referenciasebesség ( $U_{ref}=4,9$  m/s 5 m/s helyett) s feszítőerő ( $F=14$  N az itteni 15 N helyett).

Az előzőekben bemutatott energiaspektrumok mellett azt is megvizsgáltam, hogy egy állandó feszítőerő ( $F=10$  N) esetén miként változik a spektrum alakja különböző áramlási sebességeken ( $U_{ref}=4-5-6$  m/s), azonban egy adott pozícióban ( $x/M=10$ ). E variációt a 31. ábra szemlélteti.



31. ábra Alapáramlás irányú energiaspektrumok  $F=10\text{ N}$  feszítőerő esetén,  $x/M=10$  pozícióban, továbbá a  $-5/3$ -os meredekségű hatványfüggvényt szemléltető görbe. Jelmagyarázat: '—'  $U_{ref}=4\text{ m/s}$ ; '- -'  $U_{ref}=5\text{ m/s}$ ; '- · -'  $U_{ref}=6\text{ m/s}$ . A lokális amplitúdó-csúcsokhoz tartozó hullámszám értékek az ábrán feltüntetve.

A diagram alapján egyrészt igazolható, hogy nagyobb áramlási sebességek rendre nagyobb turbulens kinetikus energiájú áramlást hoztak létre (ahogy az a 8. ábrán is látható): a növekvő sebességgel együtt nagyobb területek mérhetők az egyes görbék alatt. Emellett adott feszítőerő esetén a sebesség növekedésével együtt csökken a lokális maximumhoz tartozó hullámszám értéke. Az  $U_{ref}=4\text{ m/s}$  sebességhez  $\kappa=148\text{ 1/m}$  tartozik, ami alapján  $f=94,2\text{ Hz}$ . Ezt összevetve a 29. ábra ennek megfelelő  $f_{sz}=99\text{ Hz}$ -es értékével kisebb, mint 5%-os relatív eltérés adódik.

Az e fejezet részben bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy a rezgő elemeket tartalmazó szalag-rács jelentős mértékű turbulenciát tud létrehozni alacsony áramlási sebességek esetén is. A kisméretű szélcsatornában több esetben is sikerült  $Re_\lambda=300$ -as Taylor-Reynolds számtól nagyobb értékű turbulenciát előállítani, amely jelentős növekedésnek tekinthető. A vizsgált rács felépítéséből adódóan (függőleges szalagok) azonban a rács után több, mint  $10M$  távolságban is jelentős anizotrópiát mértem, amely miatt a vizsgált tartománytól nagyobb távolságokban is ( $x/M>30$ ) szükséges lett volna méréseket végezni, azonban a szélcsatorna dimenziói ezt nem tették lehetővé. Fontos észrevétel az, hogy a rácsok rezgési frekvenciája jelentős hatással van a turbulencia energiaspektrumára, amely a szakirodalmi eredményektől eltérően a spektrum-görbék tehetetlenségi szakaszán egy lokális maximumot eredményez. Ez az eltérés azonban a távolság növelésével csökken,  $x/M=30$  esetén már elhanyagolható mértékű.



## 8. PRÉSLEVEGŐVEL MŰKÖDTETETT AKTÍV-RÁCS ÖSSZEÁLLÍTÁSA, LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATA

A szalag-rács kísérletek mellett doktori kutatómunkám jelentős részében a flexibilis csövecskéket tartalmazó légsugár-rács vizsgálatával is foglalkoztam. Többek között a rács aktív elemeinek mozgási jellegét, a rács által létrehozott turbulencia jellemzőit, továbbá a segítségével elérhető intenzív keveredést is vizsgáltam. E kutatásaimhoz mindig az adott feladatnak megfelelő mérés technikát alkalmaztam: *CTA*-t, nagysebességű kamerát, továbbá hőkamerát. Ebben a fejezetben részletesen bemutatom a nagysebességű kamerákkal készített vizsgálatokat s azok eredményeit (mind Magdeburgban, mind pedig Miskolcon végzett kísérletek); ezt követően a Miskolcon elvégzett *CTA* vizsgálatokat s azok eredményeit ismertetem; továbbá a rács által keltett turbulenciának különböző hőmérsékletű gázok keveredésének vizsgálatát s ennek eredményeit mutatom be.

A prototípus rács pozitív eredményei alapján (lásd 4. ábra és 5. ábra) Magdeburgban elkészítettek egy szélcsatornába is beépíthető sugár-rácsot. Ez a prototípussal megegyező rácsparaméterrel ( $M=25$  mm) úgyszintén négyszög keresztmetszetű ( $D=5$  mm oldalhosszúságú), 0,45 mm-es falvastagságú üreges rácselemekből lett összeállítva. E rács azonban a prototípustól lényegesen nagyobb, összesen  $20 \times 21$  rácselemből készült el. Így a rácsfelület (a keretet nem beleszámítva) több, mint  $500 \times 500$  mm-es méretével alkalmas volt a magdeburgi szélcsatorna mellett a Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék laboratóriumában található Göttingen-típusú szélcsatornába történő beépítésre is. Az elkészített rács szimmetrikus felépítéséből adódóan a  $\sigma$  kitöltési tényező értékét a

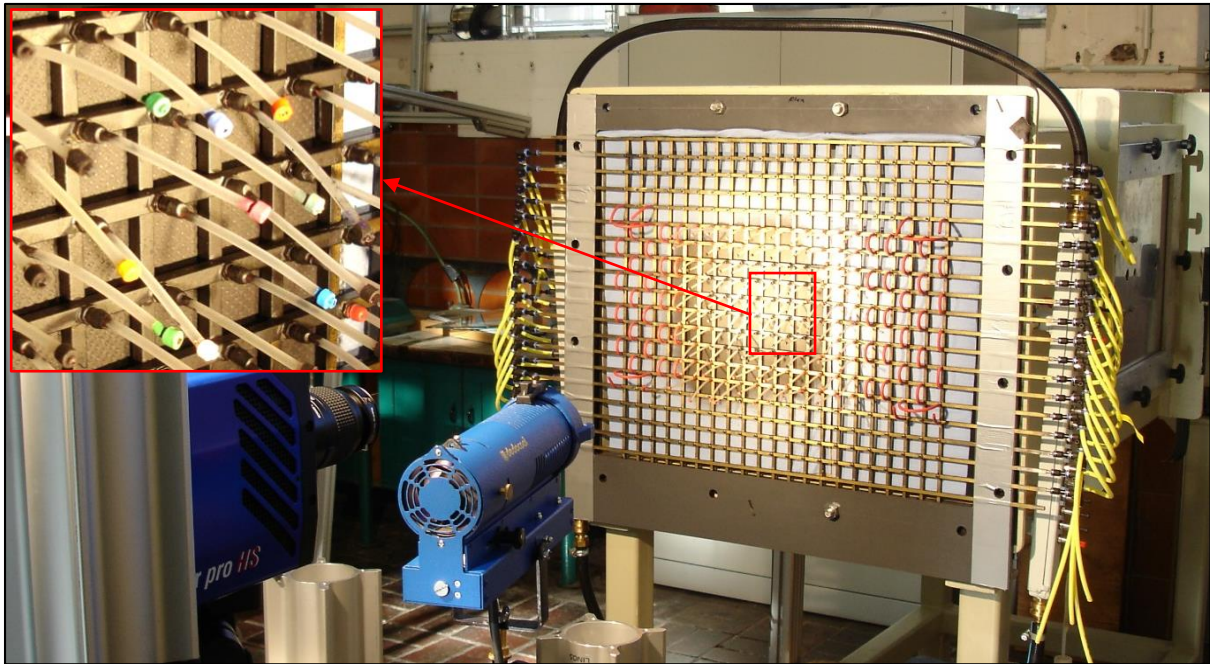
$$\sigma = \frac{D}{M} \left( 2 - \frac{D}{M} \right) \quad (8.1)$$

összefüggés alapján számítottam ki. A kitöltési tényező értéke  $\sigma=0,36$ -ra adódott, amely érték jóval a  $\sigma=0,5$ -es érték alatt van, ezzel teljesítve az ide vonatkozó szakirodalmi ajánlást (Villermaux et al., 1991), miszerint  $\sigma=0,5$  környezetében, s attól nagyobb értékeknél a rácson áthaladó áramlás inhomogénné válik. A rácspontokba épített csatlakozóelemekre lettek rögzítve az aktiválható elemek, azaz a szilikoncsövek. A rács vízszintes rácselemeinek mindkét vége rugalmas pneumatikai csövekkel egy-egy levegőosztó-elembe csatlakozott, amelyek alsó és felső végükön is el voltak látva 1 collos csatlakozóelemekkel a minél szimmetrikusabb légbevezetés érdekében. A rácspontokra elsőként, a nagysebességű kamerás mérések idején a diplomamunkám alapján legjobbnak ítélt aktívelem-variáció lett rögzítve, azonban a későbbi vizsgálatok során attól eltérő dimenziókkal rendelkező elemek kerültek alkalmazásra, azok előnyösebb tulajdonságai miatt.

### 8.1. Az aktív elemek kinematikájának vizsgálata Magdeburgban

Az első mérések során aktív elemek gyanánt a diplomamunkám alapján legjobbnak talált paraméterű szilikoncsövek lettek minden egyes rácsponthoz illesztve. Ezek  $d_i=2$  mm belső és  $d_o=2,6$  mm külső átmérővel rendelkeztek, s aktív hosszuk,  $l_a=55$  mm volt. Fontos továbbá, hogy a szilikoncsövek mozgó végére a tehetetlenségük – s ilyen módon a mozgásjellemzőik – növelése céljából extra csövecskék lettek felerősítve (3 mm hosszú, 4 mm külső átmérőjű, 1 mm-es falvastagságú). A korábbi vizsgálataim során azt találtam, hogy az extra súllyal szerelt

elemek kisebb nyomású préslevegő esetén jöttek mozgásba, mint a rászertelt tömeg nélküli variáció. Ezért az első, a rácselemek mozgásának vizsgálatát célzó gyorskamerás kísérletek is ezzel a rácsoösszeállítással kerültek végrehajtásra. A szélesatorna-szakaszra épített s nagysebességű kamerával vizsgált rácsoösszeállítás a 32. ábrán látható.



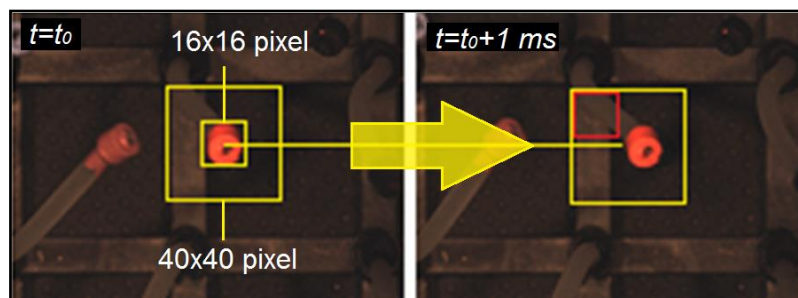
32. ábra Az első gyorskamera-vizsgálatokhoz összeállított rácso.

Mivel a mérések során még nem állt rendelkezésre olyan kapacitású sűrítettlevegő-hálózat, amely megfelelő mennyiségű préslevegőt tudott volna előállítani a teljes rácso (összesen 387 aktív elem) működtetéséhez, továbbá – mérés technikai szempontok okán – összesen  $3 \times 3$  db csövecské mozgását kívántuk vizsgálni, ezért csupán a rácso középső,  $10 \times 11$ , egymással szomszédos rácspontja lett aktív elemekkel ellátva, s sűrített levegővel működtetve. A rácso aktív üzemiállapota esetén az egyes csövecskéken kiáramló levegő térfogatáramának mérésére nem volt lehetőség, ezért ezek megegyezőségének feltételezése csak kvalitatív, érzékszervi megfigyelés alapján történt: a préslevegő nyomásának fokozatos növelésének hatására az egyes csövecskékek közel azonos nyomás esetén jöttek mozgásba, ennek alapján feltételeztük a kiáramló levegők mennyiségének hasonlóságát. A mérések *LaVision VC-Imager Pro HS 4M* típusú kamerával történtek (főbb adatait az **M5** melléklet tartalmazza), továbbá a képsorokat *MATLAB* programmal dolgoztam fel (Blanchet & Charbit (2006) könyvében leírtakat felhasználva). A mérésről s annak eredményeiről e dolgozaton túl, részletesen a Szaszák et al. (2014) folyóiratcikkben számoltunk be.

Az aktív elemek mozgásának vizsgálata a csövecskékek mozgásának megfigyelésével történt. A kamerás mérés technikával a mozgó végpontoknak a rácso síkjával párhuzamos elmozdulásait tudtuk detektálni, az erre a síkra merőleges mozgások nem képezték vizsgálat tárgyát. Ilyen módon a mozgó elemek vizsgálatához úgy kellett megválasztani a képkészítés gyakoriságát ( $\Delta t_k$ ), hogy az egyes képpárokon látható végpontok között csupán néhány pixeles elmozdulás legyen mérhető. Az előzetes mérések alapján az  $f_k=1\text{kHz}$ -es érték megfelelően gyakori képkészítési rátának adódott. A beállított frekvencián egy-egy mérési sorozatban 1 s ideig történt a felvételi készítés, amely eredményeként 1000 db bitmap típusú, 24 bites színmélységű

képet rögzített a kamera. E képeket aztán a *MATLAB*-ban írt scripttel dolgoztam fel, amelynek működése összefoglalva a következő.

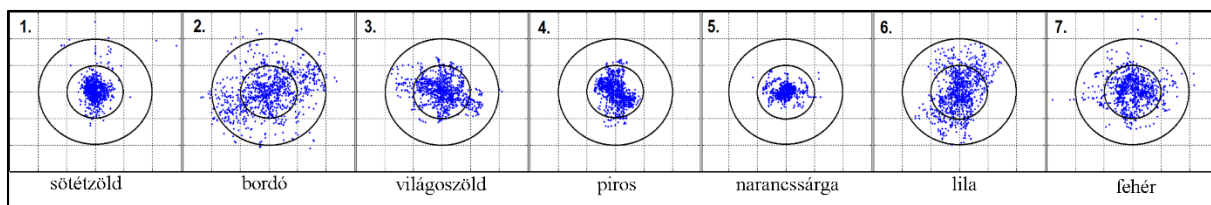
Ahhoz, hogy a vizsgált, összesen 9 darab cső mozgását szoftveresen is meg lehessen különböztetni, mindegyik esetében a végükön található extra csővecske különböző színt kapott. Ennek segítségével a programban különböző *R-G-B* (red-green-blue) színtartományokat tudtam megadni, ami alapján a keresőalgorithmus azonosította az adott színű csővég pozícióját. A program futásának gyorsítását olyan módon sikerült elérni, hogy a keresőalgorithmusnak mindössze az első képkockán kellett lefutnia a teljes képen. Mivel a képfelvétel megfelelő gyakorisága miatt csupán néhány pixel elmozdulás volt várható a szomszédos képkockák között, ezért az első képen beazonosított színhalmazok jellemző pozícióit a következő képeken csupán az előző pozíció környezetében (általában választott,  $40 \times 40$  pixeles) kellett keresni. Így tehát nagymértékben tudtam csökkenteni a program futási idejét. A keresőalgorithmus működését szemlélteti a 33. ábra.



33. ábra A bordó csővég  $t$  időpillanatbeli pozíciójának keresése a  $t_0$  idején készített képen lévő pozícióhoz képest. Sárga keret: a keresési intervallum, piros keret: bordó pixeleket számláló, soronként és oszloponként pixelről pixelre végigszaladó keresőablak (Szaszák et al., 2014).

Ezt az algoritmust a későbbi tapasztalok alapján a kilencből hét szín (1.-7.) esetében lehetett alkalmazni (két-két szín esetén az R, G, B tartományok részben fedték egymást), amelyeknél így tehát megkaptam az egyes csővégek pixel-pozícióját a képkockák sorszámának függvényében. Fontos megemlíteni, hogy a csővégek jellemző pozíciója (pixelpár) a keresőalgorithmus által talált legtöbb, az adott színnek megfelelő pixelt tartalmazó keresőnégyzet középpontjának felelt meg. Az egyik kép alapján kiszámolt térbeli felbontással (pixel/mm aránnyal) a pixel-pozíciót fizikai pozícióba ( $y_{cs}$ ,  $z_{cs}$ ) számoltam át, továbbá a képkészítési frekvencia alapján az egy-egy kép közötti időtávval megkaptam a vizsgált elemek pozíció-idő függvényeit. A feldolgozás során adódtak a trendből kilógó, hibás értékek is (például beárnyékolás miatt), amely hibák korrekciójához a legkisebb négyzetek módszerén alapuló „smooth” simítófüggvényt alkalmaztam.

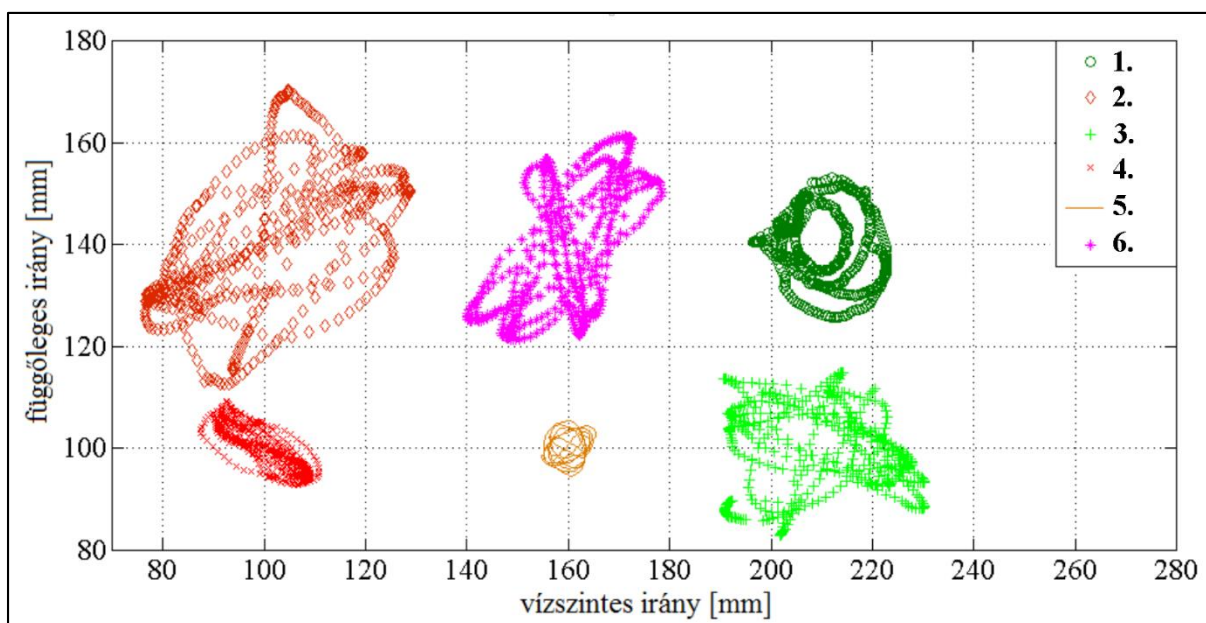
A program további részében a függvények feldolgozása, s különböző diagramokkal történő szemléltetése történt meg. Elsőként az egymást követő képpárok esetén a csővégek közötti pozíció-eltérést vizsgáltam (tehát azt, hogy  $\Delta t_k$  idő alatt mennyi pixelt mozdul el a csővég  $y$  és  $z$  irányban), mivel ez többek között információval szolgál az adott csővég jellemző sebességértékeire (34. ábra).



34. ábra A vizsgált csővégek pixel-elmozdulásai egy-egy képkocka között. A rács osztása 5 pixelnek felel meg. (Szászák et al., 2014).

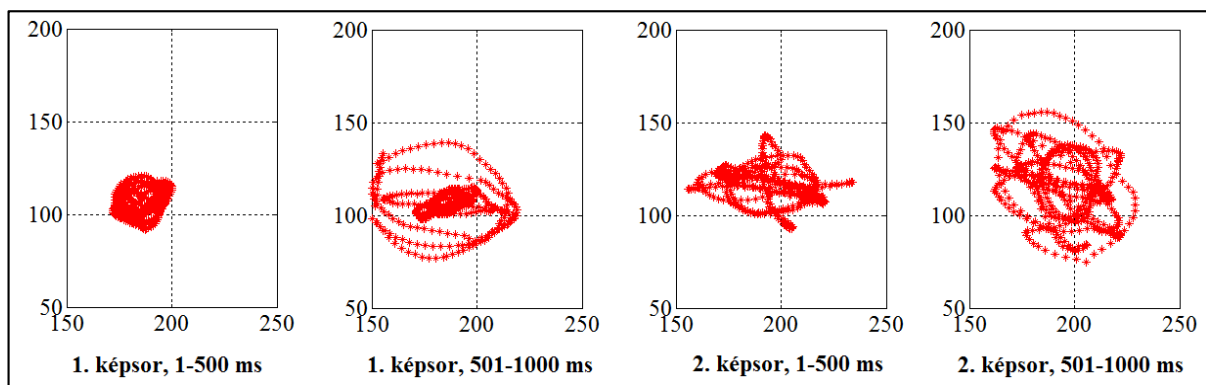
Az ábra alapján látható, hogy például az 5. csővég elmozdulása a vizsgálat idején 5 pixelen belül maradt (négy pont kivételével), tehát viszonylag kis sebességgel mozgott. Ehhez képest a 2. vagy a 6. sorszámmal jelölt csővégek jóval több, sok esetben 5 pixel feletti elmozdulást produkáltak, amely nagyobb sebességre utal. E megállapítást a képsorozatból készült videofelvétel is igazolta.

Amennyiben a fizikai pozíciókat a mozgás síkjában ( $y$ - $z$ ) ábrázoljuk, úgy megkapjuk az egyes csővégek által a felvétel idején leírt pályagörbéket. 500 ms-os felvételi idő alatt, hat különböző színű csővég (1.-6.) mozgásának vetületi pályáját mutatja a 35. ábra. Az ábra alapján látható, hogy összefüggés mutatkozik az elmozdulás, tehát a sebesség és a nyomvonal kiterjedtsége között: kis pixel-elmozdulásokhoz (34. ábra) rendre kisebb bejárt terület tartozik, tehát a mozgó csővég kisebb mértékű kitéréseket produkál, mint a nagyobb sebességgel mozgó elem. Ennek a magyarázata abban kereshető, hogy a nagyobb mértékben kitérő elemekre a belőlük kiáramló levegő által ható impulzuserőnek nagyobb a vizsgált síkkal párhuzamos ( $y$  és  $z$  irányú) komponense, tehát ilyen módon jobban gyorsítja a csővéget a síkkal párhuzamos irányban. Ebből adódóan nagyobb maximális sebességet is elérhetnek ezek a csővégek. Ez továbbá megfigyelhető a 35. ábrán például a 2. vagy a 6. csővégnél is, ahol a befutott pályák által meghatározott területek közepe környezetében nagyobb távolságok adódnak az egyes pályapontok között ( $\Delta t_k$  időköz állandó értékű, így ez nagyobb sebességet jelent).



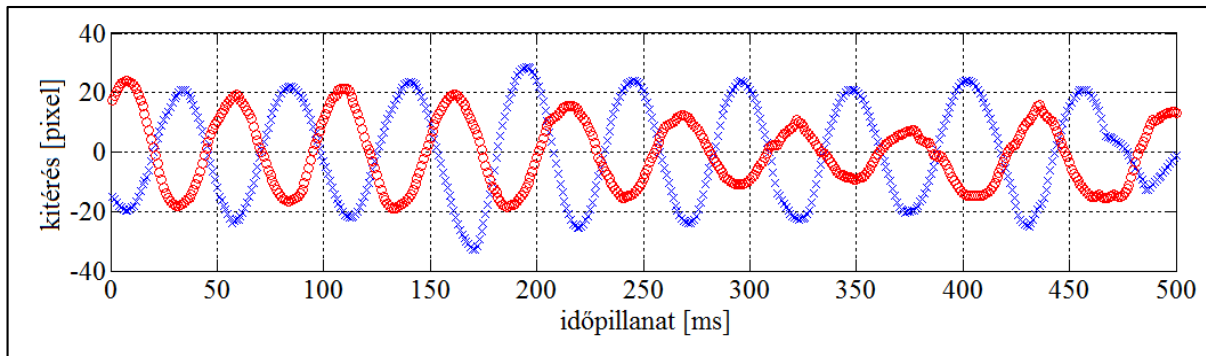
35. ábra Hat vizsgált csővég által bejárt pályák arányos nyomvonalai a  $0 \div 500$  ms időintervallumban. Az egyes pályák a jobb áttekinthetőség miatt alkalmasan el lettek tolvá.

A 35. ábra alapján azonban még egy, igen fontos megállapítás is tehető: a felrajzolt pályagörbék mindegyik vizsgált csővég esetében elliptikus jellegűek, azonban több csővég esetén is megfigyelhető, hogy az ellipszis tengelyei elfordulnak a vizsgált intervallumban. Ennek magyarázatát egyrészt az egymás irányába légsugarakat kilövellő csövek kölcsönhatásában kereshetjük, továbbá – miként azt a geometriai jellemzők lehetővé tették – a mozgó csövek számos esetben ütköznek, ami okán pályájuk igen rövid idő alatt megváltozik. Ebből adódóan arra is kerestem a választ, hogy milyen pályagörbe-eltérések mutatkoznak egy-egy adott csővégnél, ha a vizsgált időszávot változtatom. Mivel a 0÷500 ms időtartományban az 5. csővég közel állandó méretű ellipszis alakú pályákat futott be, ezért megvizsgáltam, hogy változik-e ez a pálya későbbi időtartományokban. A 36. ábrán látható, hogy ugyanaz a csővég más és más pályákat jár be adott, de különböző időpontoktól vizsgált időintervallumokban, így feltételezhető, hogy elegendő idő alatt a fizikailag lehetséges pályaterületen belül minden pontot érint.



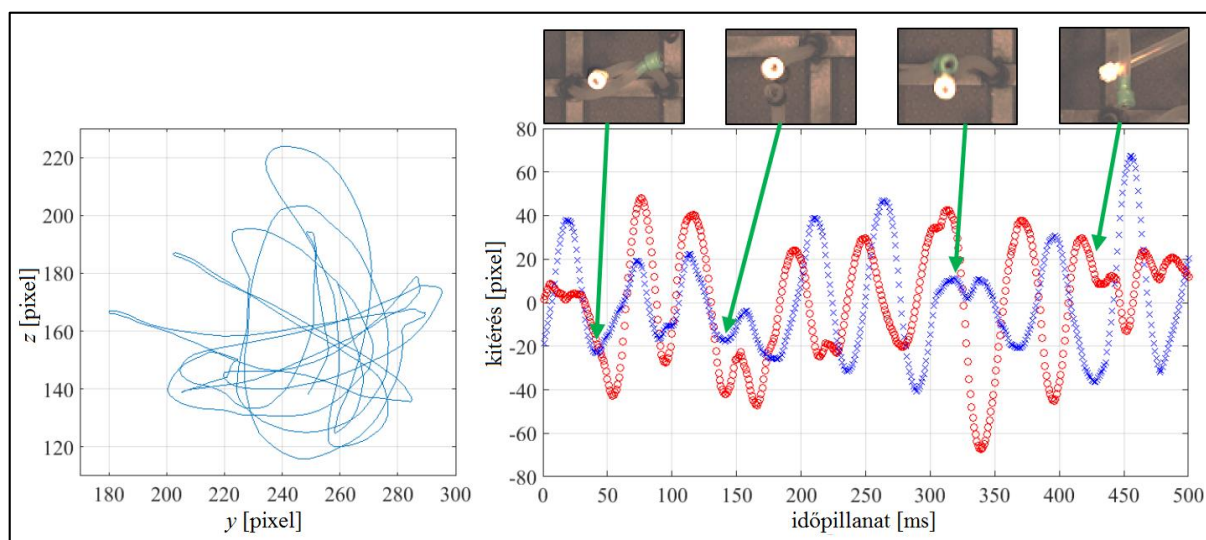
36. ábra Az 5. csővég pályaformái különböző időintervallumokban, két, időben máskor rögzített képsor esetén (a vízszintes ( $y$ ) és függőleges ( $z$ ) koordináták mm-ben).

Mivel az elliptikus jellegű pályagörbék alapján felvetődik a periodikus mozgásjelleg, ezért ennek vizsgálatával részletesebben is foglalkoztam. A 35. ábrán látható 4. csővégre tartozó pályagörbe mutatja a leginkább periodikus jelleget, ezért ennek a pozíció-idősorai alapján további megállapításokat tehettem. A vízszintes ( $y$ ) és a függőleges ( $z$ ) irányú pozíciók idősoraiból kivontam azok átlagértékét, így az átlagos pozícióhoz képesti elmozdulásokat tudtam megvizsgálni. Külön-külön, az idő függvényében, 1÷500 ms-os intervallumban ábrázolva az  $y$  és a  $z$  irányú eltérés a 37. ábrán tekinthető meg. Látható, hogy mindkét irányú kitérés közel azonos frekvenciájú (azonos számú teljes periódus figyelhető meg mindkét görbénél), amely esetben az ellipszis alakú pálya tengelyei nem fordulnak el. Azonban az amplitúdók egyik elmozdulás esetében sem állandóak az idő függvényében, ezért változik a pálya nyomvonala, az átlagos helyzettől való kitérés is (35. ábra).



37. ábra A 4. csővég átlagos pozíciójához viszonyított  $y$  és  $z$  irányú kitérései az idő függvényében,  $0\div 500$  ms időintervallumban. Jelmagyarázat: vízszintes ( $y$ ) irányú kitérés:  $\circ$ ; függőleges ( $z$ ) irányú kitérés:  $\times$ .

A bemutatott, 4. jelű csővég periodikus mozgásától nagymértékben eltért a 7. csővecske mozgása. Ennek a  $0\div 500$  ms-os időintervallumban befutott pályáját mutatja a 38. ábra bal oldali diagramja, miközben annak a pálya középpontjától mért, az idő, mint paraméter függvényében ábrázolt vízszintes ( $y$ ) és függőleges ( $z$ ) kitéréseit szemlélteti a 38. ábra jobb oldali diagramja. Ebben az esetben megfigyelhető, hogy a vizsgált intervallumon belül a csővég igen eltérő pályagörbék mentén mozgott, s a pályájának több részén is hirtelen irányváltás következett be. Ennek magyarázatát a képsorok alapján találtam meg: a 7. sorszámmal jelölt, fehér végű aktív elem más, szomszédos csövekkel való ütközései okozták a hirtelen irányváltásokat. Ebből tehát feltételezhető, hogy az aktív üzemiállapotú rács mozgó elemei esetén, azok minél sztochasztikusabb működéséhez hozzájárul a szomszédos aktív elemek egymással történő összeütközése. A 38. ábra jobb oldali diagramján az előző ábrához hasonlóan a vizsgált pályaszakasz középső pontjához viszonyított  $y$  és  $z$  irányú kitérések láthatók az idő függvényében. Ellentétben a 37. ábrán látható periodikus jelleggel, ebben az esetben mind a frekvencia, mind pedig az amplitúdó jelentős mértékben változik mindkét kitérés-komponens esetében, amely az ütközéseknek tulajdonítható. E feltevésre bizonyítékul szolgálnak a 38. ábra jobb oldali diagramja feletti képkivágások, amelyek az adott, nyílal jelölt hirtelen pozícióváltásokhoz tartoznak.

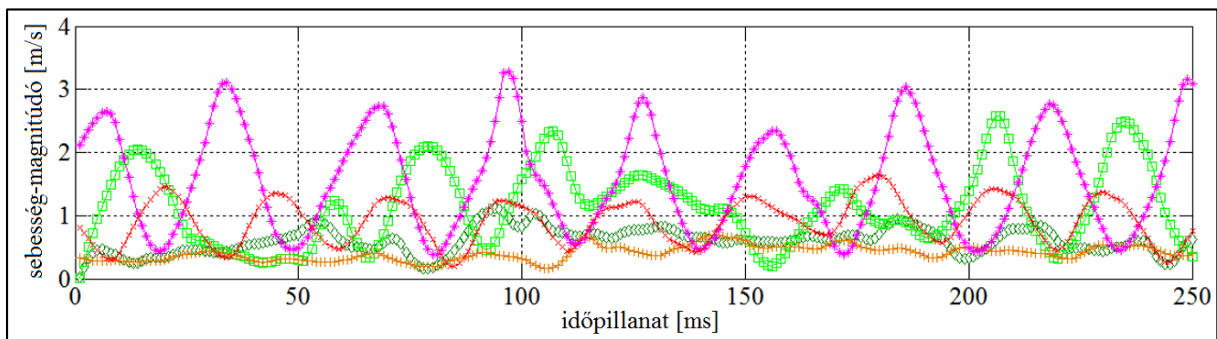


38. ábra A 7. (fehér színű) csővég  $1\div 500$  ms intervallumban befutott pályája (bal oldal) és a pálya középpontjától mért  $y$  és  $z$  irányú kitérések az idő függvényében, az egyes ütközéseket szemléltető képkivágásokkal (jobb oldal). Jelmagyarázat: vízszintes ( $y$ ) irányú kitérés:  $\circ$ ; függőleges ( $z$ ) irányú kitérés:  $\times$ .

A csővégek pixel-elmozdulásainak vizsgálatán túl, az egyes pixel-idősorokból előállíthatók voltak az adott csővégek sebesség-idő függvényei is. Ehhez rendelkezésre állt az egymást követő képek között eltelt  $\Delta t_k$  időtáv, az adott csővég pixel-pozíciójának y és z irányú komponense, továbbá az egyik képet felhasználva meghatároztam a képek térbeli felbontását, ami  $C_{res}=0,3802$  mm/pixel értékre adódott. Ezek felhasználásával meghatároztam a pillanatnyi (valójában az adott képpár közötti  $\Delta t_k$  időtávra átlagolt) sebesség nagyság értékeit, amelyeket a (8.2) definíció szerint határoztam meg:

$$v_i = C_{res} \cdot \sqrt{\left(\frac{y_{i+1}-y_i}{\Delta t_k}\right)^2 + \left(\frac{z_{i+1}-z_i}{\Delta t_k}\right)^2} \quad . \quad 8.2$$

A kapott  $v_i$  sebességértékeket a képkocka sorszámának megfelelő időpillanathoz társítva megkaptam a sebesség-idő függvényt, amelyet a „smooth” függvénnyel simítottam az esetleges hibákból adódó kiugró értékek eliminálása miatt. Ennek eredményeként kapott, összesen öt különböző aktív elem mozgására jellemző sebességértékeket szemléltet a 39. ábra, amelyen a jobb átláthatóság érdekében csupán a 0÷250 ms-os időintervallumhoz tartozó értékeket tüntettem fel.



39. ábra Különböző aktív elemek végeinek sebesség-idő függvénye az 1÷250 ms-os intervallumban.  
Jelmagyarázat: 1. csővég: ◊; 2. csővég: ×; 3. csővég: □; 5. csővég: +; 6. csővég: \*.

Az ábra alapján látható, hogy több csővégnek is periodikus jelleggel változik a sebessége (4., 6.), azonban ezekkel szemben a 1. és a 3. elemek sebessége rendszertelenül változik, amely szintén a bekövetkezett ütközésekre vezethető vissza. Emellett megfigyelhető az is, hogy a maximális sebességek is jelentősen eltérnek. A mozgásuk során nagyobb felületet lefedő csövek nagyobb maximális sebességet érnek el, mint a kisebb kitérést mutató elemek. E megfigyelés a már előzőleg bemutatott pixel-elmozdulásokkal (34. ábra) és a pályagörbékkel (35. ábra) is összhangban van. A nagyobb kiterjedésű pályagörbe esetén a csővégből kilépő áramlás impulzuserejének nagyobb része jut a csővég vizsgált síkkal párhuzamos irányú gyorsítására, így a nagyobb erőkomponens a hosszabb, az erő irányába eső úttal együtt nagyobb sebességértékre képes gyorsítani az elemet.

Az előzőekben bemutatott eredmények alapján egyrészt megállapítható, hogy a gyorskamerával megfigyelt aktív elemek a vizsgálat időintervallumának függvényében változó pályákat sűroltak a vizsgált y-z síkban. Ebből adódóan elmondható, hogy megfelelően hosszúra választott időintervallum esetén az egyes csővégek által bejárt pályagörbék külső pontjait összekötő görbe közel kör alakú, amely körön belül a csővég bármelyik pozícióban előfordulhat. Megállapítható, hogy a szomszédos csövek mozgás közbeni véletlenszerű

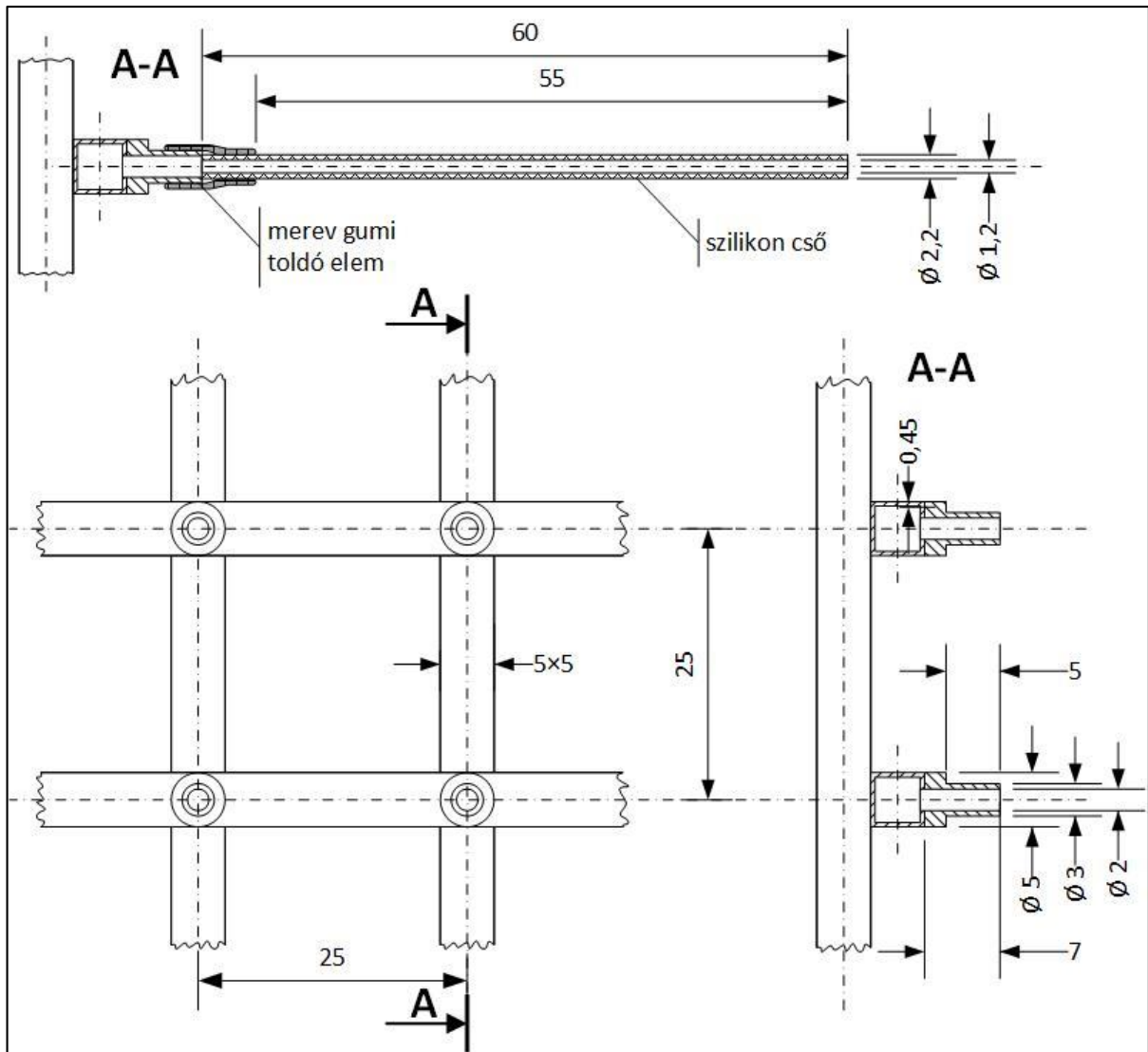
ütközése jelentős befolyással van a csövek mozgására, amelyek így megváltoztatják addigi pályájukat, amely együtt jár a belőlük kilövellő légsugár irányának megváltozásával. Így tehát a nagyszámú aktív elem interakciójából feltételezhetően időben sztochasztikusan változó irányú légsugarak jutnak az alapáramlásba. A vizsgálatok azonban arra is rámutattak, hogy az egyes aktív elemeknél a burkoló kör más és más méretű, tehát „kevésbé aktív” és „aktívabb” elemek egyaránt előfordulnak a rácson. Ez feltételezhetően az egyes aktív elemek fizikai s mechanikai tulajdonságainak eltéréseiből adódhat, emellett továbbá a csövek végén elhelyezett extra tehetetlenségként szolgáló csődarab pontatlan mérete és elhelyezése is szerepet játszhat. Azért, hogy az egyes aktív elemek mozgásjellemzői hasonlóbbak lehessenek (közel azonos befutott pálya, hasonló sebesség-értékek), feltételezésem alapján olyan elemek használata merült fel, amelyek esetén nem szükséges az extra tömeg alkalmazása. Így olyan, az eddig vizsgált típusoktól lágyabb, rugalmasabb csövek lettek beszerezve, amelyek közel azonos mozgásjellemzőkkel bírtak, mint a vizsgált variáció.

Az új, előzőleg még nem vizsgált szilikoncsövekkel, mint aktív elemekkel felszerelt rácst a későbbiekben Miskolcra szállítottuk, s az a Tanszék laboratóriumában található Göttingen-típusú szélcsatornába került beépítésre az általa létrehozott turbulencia vizsgálata céljából. Itt *Chronos 1.4 C* típusú monokróm gyorskamerával volt lehetőségem az újabb aktív elemek gyorskamerás vizsgálatára.

## 8.2. Az újabb aktív elemeket tartalmazó aktív rács gyorskamerás vizsgálata a Miskolci Egyetemen

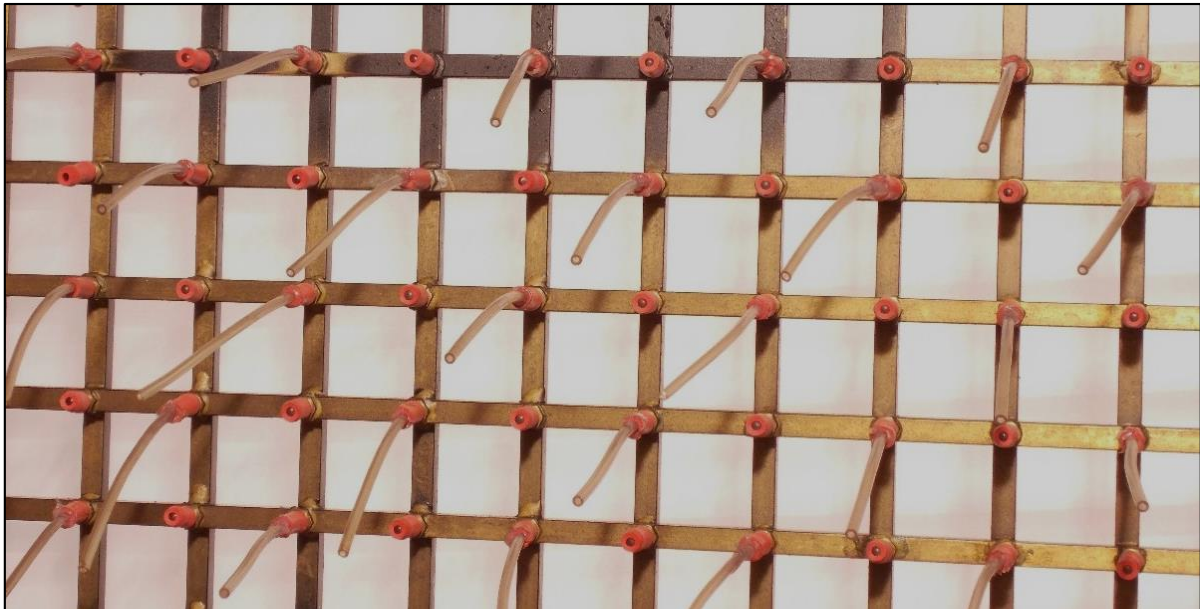
Az előzőekben bemutatott vizsgálatok eredményei alapján tehát arra a következtetésre jutottam, hogy az aktív elemek mozgásának egységesebbé tétele céljából más típusú csöveket kell alkalmazni. A feladatra *ST-EC-60-001* referenciaszámú szilikoncső bizonyult alkalmasnak. Ennek jellemző paraméterei: belső átmérő,  $d_{i,t}=1,2$  mm; a falvastagság,  $w_t= 0,5$  mm; rugalmassági modulus,  $E_t=2.2$  MPa; anyagsűrűség,  $\rho_t=1170$  kg/m<sup>3</sup>. Az aktív elemhez ebből a típusú csőből 60 mm hosszúságú szeleteket készítettem, amely hosszából 5 mm a felfogatásukhoz volt szükséges, így  $l_{a,t}=55$  mm-es aktív csőhossz adódott. Az ilyen csövecskékkel összeállított, s általam vizsgált rács egy elemének műszaki rajzát a fontosabb méretek feltüntetésével a 40. ábra szemlélteti.





40. ábra a turbulencia-vizsgálatokhoz használt, végső légsugaras-rács variáció egy elemének műszaki rajza.

A tanszéki laboratóriumban a Göttingen-típusú szélcsatorna 500×500 mm-es keresztmetszetű, a mérőtér előtt, de a konfúzor után található szakaszába lett beépítve a rács. Összesen 20×19 rácselem (üreges fémrúd) helyezkedett el az áramlási térben, a hozzájuk csatlakozó osztó-csövek a csatornán kívül, annak két oldalán kerültek kialakításra. A mérések elvégzéséhez szükséges volt az elemek aktiválásához elégséges mennyiségű préslevegő előállítása. E célra egy *BOCK F16/2050NH* típusú dugattyús kompresszort alkalmaztam. Az első vizsgálatok során megállapítottam, hogy az előállított levegő mennyisége nem elégséges az összes aktív elem együttes működtetéséhez. Megoldásként a rács minden páros sorából a páros sorszámú elemeket, továbbá minden páratlan sorából a páratlan számú elemeket vakdugókra cseréltem ki, ez tekinthető meg a 41. ábrán. Ezzel a módszerrel az első megoldáshoz képest feleannyi aktív elemet (összesen 10×9 db) kellett működtetnie a kompresszornak, amelyhez már képes volt előállítani a szükséges mennyiségű levegőt (a későbbiekben részletesen ismertetem a mérési paramétereket s a mérési összeállítást).

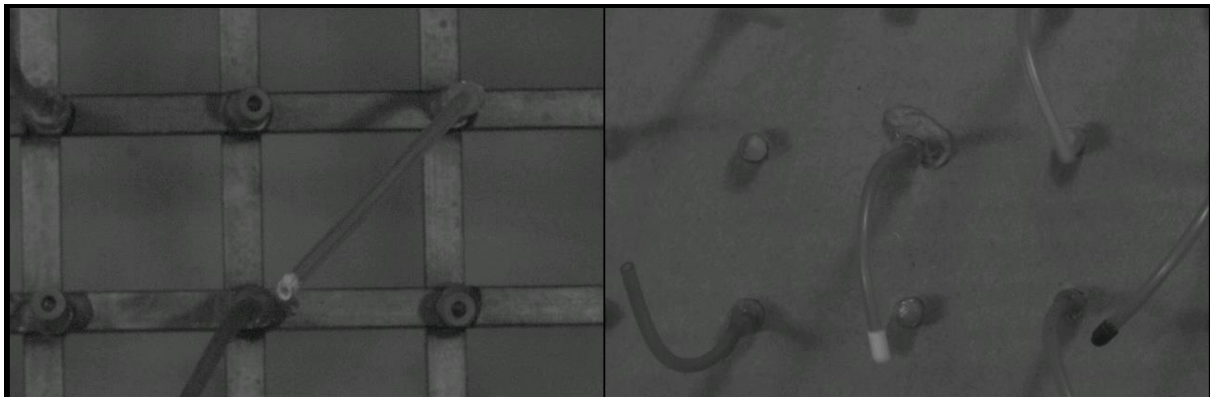


41. ábra A gyorskamerás és a turbulencia-vizsgálatokhoz használt rács részlete.

Mivel az ide vonatkozó szakirodalom alapján a légsugár-rácsokkal úgy állítható elő nagyobb intenzitású turbulencia, ha a belőlük kiáramló légsugarak az alapáramlással ellentétes irányúak (Gad-el-Hak & Corrsin, 1974), ezért a vizsgálatokhoz a rácsot szintén ilyen módon építettem be a szélcsatornába. Ennek a szakirodalom szerint az az oka, hogy ilyenkor nagyobb nyomásesés alakul ki a rács előtti és az azt követő térben, amely megfelel egy nagyobb keresztmetszetű elemekből készült rács által létrehozott intenzívebb turbulenciának (Roach, 1987), továbbá ellenáramnál nagyobb sebességkülönbségek, ebből adódóan nagyobb nyíróerők alakulnak ki az áramlási térben. A gyorskamerás méréseket ezért a csatorna konfúzorának irányából kellett elvégezni, amelyekhez a kamerát a konfúzor középvonalában egy állványra építettem fel. Fontos megjegyezni, hogy a gyorskamerás méréseket a szélcsatorna ventilátorának kikapcsolt állapotában végeztem el. Abból adódóan, hogy a kamera monokróm érzékelővel rendelkezett, e mérések során nem volt lehetőség kettőnél több, különböző színűre festett csővég vizsgálatára, hiszen azok közel azonos értéktartományban lévő színekkel eredményeztek volna a feldolgozás során. Autókorrelációs módszert alkalmazó képfeldolgozó szoftver segítségével (mint amelyet a *PIV* technika is alkalmaz az egyes részecskék nyomon követéséhez) lehetőségem lett volna kettőnél több csővég mozgásának a vizsgálatára is, azonban e vizsgálat elsődleges célja az volt, hogy meghatározzam: van-e korreláció a szomszédos csövek mozgásformái között, vagy azok egymástól független, kaotikus pályáformák szerint mozognak? Így tehát elegendőnek bizonyult két, szomszédos mozgó elemet vizsgálni.

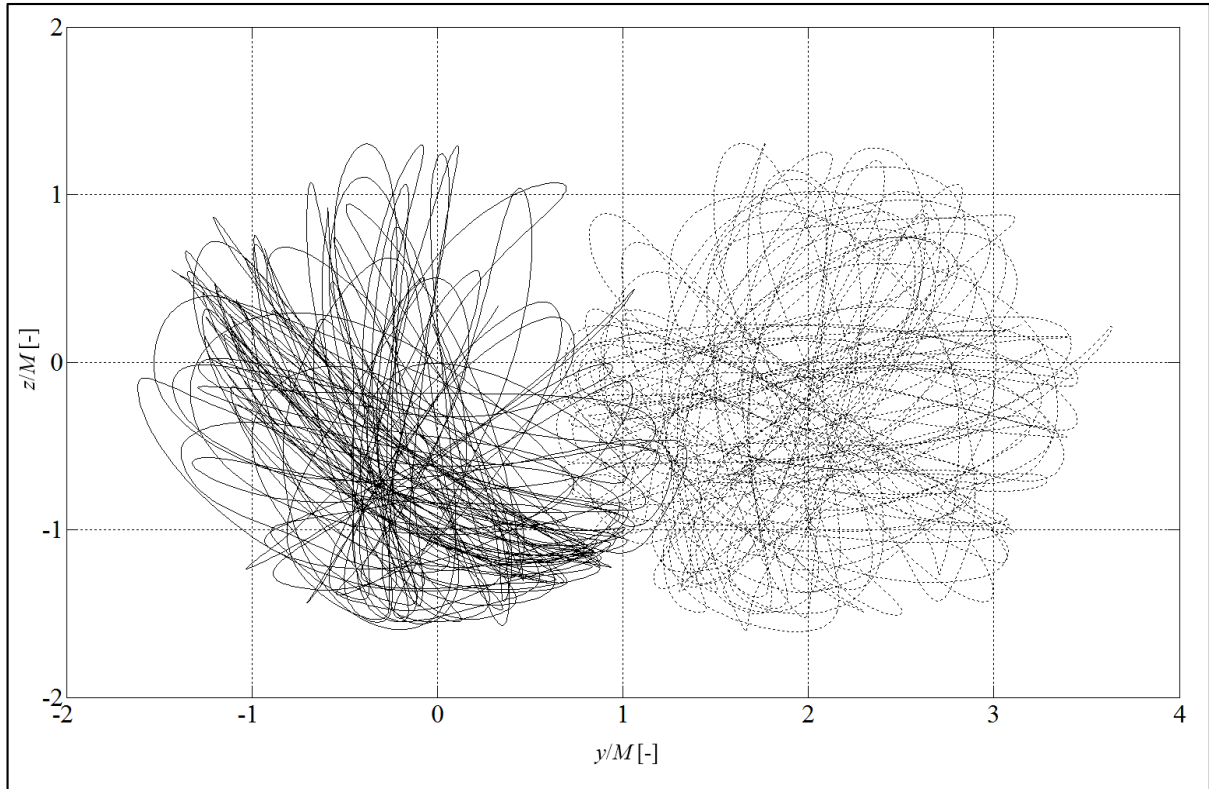
A mérések során a *Chronos 1.4-es*, *Fujian 35mm f/1.7* optikával szerelt gyorskamerát alkalmaztam (M6 melléklet), amellyel – hasonlóan az előző mérésekhez – a vizsgált csővégek pályáinak a ráccsal párhuzamos síkvetületét vizsgáltam. A kamerával készített képsorok feldolgozhatóságához tehát szükséges volt a két, vizsgált csővég pozíciójának a nyomon követése. Ezért az egyik csővéget fekete színűre (1-es), a másikat pedig fehérre festettem be (2-es), tehát a szoftverrel így két, megadott szinttartományba eső pixeleket kellett keresni. A megfelelő mérési környezettel (pl. elégséges megvilágítás) és alkalmas kamera-beállításokkal ( $f_k=2,359$  kHz,  $1024 \times 576$  pixel) sikerült megfelelő élességű képsorokat készíteni, amelyeket a

képpárokon a csővég-elmozdulások maximálisan néhányszor tíz pixeles tartományba estek, amelyek megfeleltek a feldolgozáshoz. Azonban az első képsorok alapján látható volt, hogy a képeken több, a fekete színhez közeli árnyalatú részlet is megjelenik (például a ledugózott rácspontok, továbbá a rácselemek élei), amelyek miatt a képfeldolgozás nem működne megfelelően. Azért, hogy homogénebb, szürke színű háttérrel kapjak, egy szürke kartonlemezzel takartam le a rácst, több irányú megvilágítást alkalmaztam, továbbá szürke színű nyersgumit helyeztem a ledugózott rácspontokra. Ezzel a megoldással elértem, hogy a képsorokon jellemzően fehérebbek és feketébbek a vizsgált részletek a kép többi részétől. Az inhomogén és a homogénebb háttérrel készült felvételek egy-egy képkocka-részlete látható a 42. ábrán.



42. ábra A letakarás nélküli, sötét részeket is tartalmazó képkocka (bal oldal) és a szürke színű letakarással készített kép (jobb oldal).

Az átalakított *MATLAB* script ez esetben is egy, az előző képkockán megtalált pozícióhoz képest adott pixel-intervallumban végigszaladó  $10 \times 10$  pixeles keresőablakban számolta a feltételnek megfelelő pixelek számát, s ahol a legtöbb pixel felelt meg a feltételnek, annak a keresőablaknak a középső pontját feleltette meg az adott csővég pozíciójának. A kiértékelés egy 3,2 másodperces képsoron lett elvégezve. Ennek oka egyrészt az, hogy ilyen időtartam alatt is sikerült a vizsgált csővégek pályáinak korrelációjához elegendő adatot kinyerni. Továbbá az automatikus feldolgozást jelentősen megnehezítették egy-egy képen az aktív csövek faláról visszaverődő, a kamera érzékelőjébe jutó fénysugarak, mivel ezek a képeken fehér színeként jelentek meg, számos esetben hibát okozva a kiértékelésnél. Ugyanis sok esetben előfordult, hogy a felvillanó csőfal éppen a vizsgált, fehér színű csővég közvetlen szomszédságába került, tehát a vizsgált képrészben jelent meg. Ekkor az algoritmus a későbbi képeken a nagyobb fehérsége miatt pedig a csőfal fényes részét kezdte el követni a fehérre festett csővég helyett. Ezért az ilyen képek manuális korrekcióra szorultak, amely igen időigényes feladat volt: ezeken a képeken a nemkívánatos fehér, jellemzően vonalszerű alakzatokat szürke színűre festettem be. A 3,2 másodperces időtartam alatt vizsgált, egymástól éppen  $2M$  távolságban felszerelt elemek végeinek mozgási nyomvonalait a 43. ábra szemlélteti olyan módon, hogy a koordináta-rendszer origója éppen abba a rácspontba lett eltolva, amelyhez a bal oldali aktív elem került csatlakoztatásra, így tehát a szomszédos aktív elem középpontja éppen  $(y=2M, z=0M)$  koordinátájú (Szaszák et al., 2018b).



43. ábra A két vizsgált csővég (1 és 2) mozgásának nyomvonalai 3,2 másodperces időintervallumban.

Az ábra alapján elmondható, hogy még ilyen, viszonylag rövid idő alatt is jelentős utat futnak be a vizsgált elemek. Ahogy azt már az előzőekben bemutattam, a mozgás periodicitást mutat a rácspont körül, azonban a sebességvektorok iránya rendszertelenül változik, amelynek oka az egymás mellett lévő csövek s a belőlük kiáramló légsugarak kölcsönhatásából adódik. Fontos észrevétel továbbá, hogy még a vizsgált (azaz csak minden második rácspontban elhelyezett aktív elemes) rendszer esetén is átfedés mutatkozik az egyes elemek pályái által lefedett területek között, így fizikailag lehetséges az elemek ütközése. Továbbá megfigyelhető, hogy miközben a jobb oldali elem mozgásának középpontja közel megegyezik a rácspont helyzetével, a bal oldali pályagörbe valamelyest lefelé tolódott el a rácsponthoz képest. Ennek lehetséges oka az aktív elem görbülete lehet, hiszen a csőtekercsből ledarabolt csőszakaszok eredendően görbültek. Természetesen felmerült a gravitáció hatásának figyelembevétele is, azonban számításaim alapján (**M11** melléklet) a gravitációs mező által a ~172 mg-os aktív elemre ható erő közel két nagyságrenddel kisebb, mint az aktív esetben belőle kiáramló légsugár impulzusereje; így tehát a gravitációs erő hatása jó közelítéssel elhanyagolható.

Miután az idő, mint paraméter függvényében meghatároztam a pályapontok koordinátáit tartalmazó kétdimenziós,  $y$  és  $z$  koordináta-párokat tartalmazó oszlopmátrixokat (**B**: 1-es vizsgált csővég, **W**: 2-es vizsgált csővég), megvizsgálhattam, hogy a két pályagörbe között milyen erősségű korreláció figyelhető meg, ugyanis ez alapján dönthető el, hogy a rácselemek mozgáspályái között van-e kapcsolat. Ehhez a *MATLAB* program beépített, kétdimenziós korrelációs, *corr2* függvényét alkalmaztam, amely a 8.3 összefüggés alapján számítja ki a korrelációs együtthatót:

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (W_{mn} - \bar{W})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (W_{mn} - \bar{W})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}}, \quad 8.3$$

ahol:

$B_{mn}$  az 1-es csővég pályagörbéjének  $m$ -edik értékpárjához tartozó  $x$  vagy  $y$  koordinátája,  
 $W_{mn}$  a 2-es csővég pályagörbéjének  $m$ -edik értékpárjához tartozó  $x$  vagy  $y$  koordinátája,  
 $\bar{W}$  a  $\mathbf{W}$  mátrix elemeinek átlagértéke,  
 $\bar{\mathbf{B}}$  a  $\mathbf{B}$  mátrix elemeinek átlagértéke.

Így tehát a kétdimenziós korrelációs függvényt alkalmazva  $r=-0,0327$  érték adódott (Szaszák et al. 2018b). Ez az érték a  $\pm 0,19$ -es intervallumon belül található, amely alapján megállapítható, hogy a vizsgált pályagörbék között nagyon gyenge a lineáris korreláció (Evans, 1996), azaz a lineáris összefüggés közöttük jelentéktelen. Ezt kiterjesztve a teljes rácsra valószínűsíthető, hogy a rács egyes aktív elemei – adott időtáv esetén – egymástól független pályagörbéket írnak le. Fontos azonban megjegyezni, hogy a gyorskamerás vizsgálat a valódi, háromdimenziós mozgásnak csupán a ráccsal párhuzamos vetületére terjedt ki, a harmadik dimenzióban ( $x$ ) történő mozgás nem volt figyelembe véve.

### 8.3. Az aktív elemeket jellemző dimenziótlan paraméterek meghatározása

Annak érdekében, hogy a vizsgált légsugaras rács a jövőben más ilyen jellegű, tehát mozgó csöveket tartalmazó rácsokkal valamilyen módon összehasonlítható legyen, azt dimenziótlanított paraméterekkel kell leírni, amely mennyiségekhez nem társul fizikai dimenzió, így azok függetlenek az alkalmazott mértékegység-rendszerrel. Ilyen paraméterek segítségével a vizsgált, különböző aktív-elem variációkat (Szaszák, 2012; Szaszák et al., 2012a) is össze lehet hasonlítani, s a tapasztalatok alapján megadható, hogy a tesztelt variációk közül a legjobbnak ítélt aktív elemek esetén ezek a paraméterek milyen intervallumba esnek. Így hasonló eszköz tervezésekor ezek a paraméterek felhasználhatók más dimenziókkal rendelkező aktív elemek kifejlesztéséhez is. Az ilyen dimenziótlan paraméterek meghatározásához Buckingham  $\pi$ -elméletét használtam fel (Brand, 1957). Az elmélet ide vonatkozó része alapján igazolható, hogy egy  $q$  számú változóval leírt rendszer (esetemben az aktív elem „mozgékonyosságával” feltételezhetően kapcsolatban álló mennyiségek) összefüggései átalakíthatók  $q-s$  független, dimenziótlan mennyiség közötti összefüggéssé, ahol  $s$  a rendszert leíró összefüggésekben szereplő összes különböző alpmennyiség száma.

Az általam vizsgált különböző típusú,  $s$  dimenziójú aktív elemek leírásához tehát olyan paramétereket alkalmaztam, amelyek feltételezésem szerint jelentékeny befolyással bírnak az aktív elem „aktivitására”. E paraméterek a következők voltak:

- az aktív elem anyagának sűrűsége ( $\rho_t$ ),
- a rugalmassági modulusa/merevsége ( $E_t$ ),
- a belső átmérője ( $d_{i,t}$ ),
- a falvastagsága ( $w_t$ ),
- az aktív elem tömegközéppontjának a rácsponthoz való csatlakozásától mért távolsága ( $l^*$ ), amely hosszmenyiség adott esetben az aktív elem végére helyezett extra tömeget ( $m_{ex}$ ) is figyelembe veszi,
- továbbá a csövecskén keresztülráamló átlagos légtömegáram ( $\dot{m}_t$ ).

Így tehát az összesen  $q=6$  figyelembe vett paraméter alapján – az általuk tartalmazott három különböző alpmennyiség figyelembevételével – a Buckingham  $\pi$ -elmélet alapján három,

egymástól független dimenziótlan paramétert tudtam meghatározni a következőkben részletezett számítási módszer (Brand, 1957) felhasználásával.

Elsőként a választott paramétereket egy mátrixba rendeztem aszerint, hogy azok mértékegységében milyen hatványkitevővel szerepelnek a fizikai alammennyiségek: hossz ( $A_L$ ), tömeg ( $A_M$ ), továbbá az idő ( $A_T$ ):

mennyiség jele	mátrix- elem	$A_L$ [m] kitevője	$A_M$ [kg] kitevője	$A_T$ [s] kitevője
$\rho_t$	$b_1$	-3	1	0
$w_t$	$b_2$	1	0	0
$E_t$	$b_3$	-1	1	-2
$d_{i,t}$	$b_4$	1	0	0
$l^*$	$b_5$	1	0	0
$\dot{m}_t$	$b_6$	0	1	-1

Ezt követően az elmélet alapján az  $b_1$ – $b_6$  paramétereket írtam fel az adott sorban szereplő alammennyiségek kitevőivel megszorított, az alammennyiséget reprezentáló  $e_1$ – $e_3$  ismeretlenekkel:

$$b_1 = -3e_1 + e_2, \quad (8.4)$$

$$b_2 = e_1, \quad (8.5)$$

$$b_3 = -e_1 + e_2 - 2e_3, \quad (8.6)$$

$$b_4 = e_1, \quad (8.7)$$

$$b_5 = e_1, \quad (8.8)$$

$$b_6 = e_2 - e_3. \quad (8.9)$$

Az így nyert 8.4-8.9 összefüggéseket egyenletrendszerbe rendeztem, majd az egyenletrendszer alkalmas átrendezésével a  $b$  paraméterekkel kifejeztem az  $e$  ismeretleneket. Ilyen módon három, lineárisan független, nullára rendezett összefüggést kaptam:

$$b_1 + 4b_4 + b_3 - 2b_6 = 0, \quad (8.10)$$

$$b_2 - b_4 = 0, \quad (8.11)$$

$$b_5 - b_4 = 0. \quad (8.12)$$

Az így kalkulált három egyenlet (8.10-8.12) kisebb átalakításokkal felhasználható a három dimenziótlan mennyiség definiálásához. A  $b_1$ – $b_6$  paramétereket helyettesítettem az általuk jelölt fizikai mennyiségek logaritmusával. Ilyen módon kaptam a következő összefüggéseket:

$$\ln \rho_t + 4 \ln d_{i,t} + \ln E_t - 2 \ln \dot{m}_t = 0, \quad (8.13)$$

$$\ln w_t - \ln d_{i,t} = 0, \quad (8.14)$$

$$\ln l^* - \ln d_{i,t} = 0. \quad (8.15)$$

A 8.13-8.15 egyenleteket az  $e$ -ad hatványra emelve az egyenletek bal oldala adja meg a levezetés eredményeként előálló három dimenziótlan paramétert ( $C_m, C_t, C_a$ ):

$$C_m = \rho_t E_t d_{i,t}^4 / \dot{m}_t^2 \quad (8.16)$$

$$C_t = w_t / d_{i,t} \quad (8.17)$$

$$C_a = l^* / d_{i,t} \quad (8.18)$$

E mennyiségek közül kettő geometriai arányokat leíró szám:  $C_t$  a relatív falvastagság jellemző értéke, továbbá  $C_a$  az aktív elem relatív hosszát adja meg. Ebben az esetben  $l^*$  az aktív elem aktív szakaszának (s adott esetben a rajta elhelyezett extra tömeg) tömegközéppontjának az aktív csőszakasz kezdetétől mért távolsága. Ebből következik, hogy extra tömeg nélküli variációknál  $l^*$  értéke megegyezik az aktív csőhossz ( $l_{a,t}$ ) felével. A harmadik dimenziótlan paraméter ( $C_m$ ) nem csak az elem anyagtulajdonságait, s fizikai dimenzióit veszi figyelembe, hanem ez tartalmazza az elem dinamikájáért felelős légtömegáramot is. Ezért ezt a számot mobilitási-számnak neveztem el.

Az általam vizsgált aktív elem-variációk esetében a dimenziótlan értékek a következő paraméter-intervallumokon belül alakultak:

- $0,18 \leq C_t \leq 0,53$ ,
- $10 \leq C_a \leq 29$ ,
- $18\,196 \leq C_m \leq 146\,759$ .

A nagysebességű kamerával elsőként vizsgált, extra súlyt tartalmazó (8.1 alfejezet) aktív-elem variáció (1), továbbá a végleges, áramlástanai szempontból is vizsgált rács-összeállítás esetén alkalmazott aktív elemre (2) jellemző mennyiségeket s azok értékeit a 8.1. Táblázat tartalmazza.

8.1. Táblázat: a csővecskékre jellemző mennyiségek értékei

mennyiség	$l_{a,t}$ , mm	$d_{i,t}$ , mm	$w_t$ , mm	$\rho_t$ , kg/m <sup>3</sup>	$E_t$ , MPa	$m_{ex}$ , mg	$\dot{m}_t$ , g/s	$l^*$ , mm	$C_t$ –	$C_a$ –	$C_m$ –
1-es variáció	55	2	0,3	1170	2,2	48	0,60	29,2	0,15	15	124800
2-es variáció	55	1,2	0,5	1170	2,2	0	0,43	27,5	0,42	23	28600

A bemutatott paraméter-intervallumok alapján látható, hogy a legjobbnak ítélt, végső variáció esetében kapott értékek az intervallumok alsó és felső határaitól távol helyezkednek el, tehát a vizsgált esetek között nem az egyik szélső paraméterekkel rendelkező aktív elem tanúsította a legoptimálisabbnak vélt aktivitást. Az aktív elemek dimenziótlan paramétereinek meghatározását a Szaszák et al. 2018b folyóiratcikkben publikáltuk.

Az előző alfejezetekben a légsugaras rács aktív elemeinek több szempont szerinti vizsgálatai rámutattak arra, hogy az alkalmazott konstrukció(k) igen összetett mozgásformákat produkálnak azok aktív állapota esetén. Az egymás szomszédságában lévő elemek nagy gyakorisággal hatnak egymásra, amely kölcsönhatás egyrészt a belőlük éppen a másik elem felé kilövellt légsugár dinamikus nyomásából adódik, másrészt pedig maguk a mozgó csőszakaszok is fizikailag ütköznek a szomszédos elemekkel, amely hatására megváltoztatják egymás haladási irányát, s ekképp egymás mozgási pályáját is. Mivel a korrelációs vizsgálat jelentéktelen fokú lineáris kapcsolatot határozott meg a vizsgált elemek között az adott időintervallumban, így megállapítható, hogy a szomszédos csövek – habár azok adott esetben, de igen rövid időtartamban hatással vannak egymás mozgására – egymástól független

pályagörbéket írnak le, így a belőlük kiáramló légsugarak irányultsága is függetlennek tekinthető. Ez tehát a teljes rácsot figyelembe véve adott időpillanatban egy sztochasztikus légsugar-eloszlást eredményez, amely a turbulencia jellegével összhangban áll.

Az aktív elemeket leíró dimenziótlan mennyiségeket felhasználva a későbbiekben további, ilyen megoldású konstrukciók összehasonlíthatóvá válnak az itt bemutatottakkal, függetlenül az adott rendszer méretétől, a rendszer leírásához alkalmazott fizikai mértékegységrendszerrel.

#### 8.4.A légsugar-rács által létrehozott turbulencia vizsgálata

Az aktív rács esetén vizsgált elemek mozgásformáinak meghatározása és leírása mellett természetesen a vizsgálatok elsődleges célja a nyugalomban lévő (passzív állapotú) s mozgó elemeket (aktív) tartalmazó légsugaras rács áramlásra gyakorolt hatásának vizsgálata volt. Az eredeti célt figyelembe véve a kis átlagsebességű áramlás esetén létrejövő turbulencia vizsgálata volt az elsődleges elvárás. A vizsgálandó rács a már előzőleg említett szélcsatornába, – az áramlás irányából tekintve – annak közvetlenül a mérési tere előtt lett beépítve úgy, hogy az aktív elemek működés közben az alapáramlással szemben helyezkedtek el. Itt fontos megjegyezni, hogy az adott rácsponthoz elhelyezett csövecskék a passzív üzemállapotú mérések során sem kerültek eltávolításra, azok az alapáramlással szemben, a gravitáció és az alapáramlás hatására lefelé hajoltak (lásd 41. ábra). Az egyes mérési esetekben beállított kis értékű sebességek okán, passzív üzemállapotban nem jöttek mozgásba a csövecskék. Mivel a csövecskék fizikailag az áramlási térben helyezkedtek el, ezért egyértelmű, hogy passzív üzemállapotban is valamilyen hatással voltak a kialakult turbulenciára. Ezt a feltevést az elvégzett mérések – a későbbiek során bemutatott – eredményei is igazolták. A csatorna mérőterében traverzrendszer segítségével pozícionált kétkomponensű CTA szondával történtek a mérések, amelyek adatait feldolgozva összehasonlíthattam a passzív és az aktív esetben kialakult áramlás jellemzőit. Ezek közül a legfontosabb, a dolgotat következő részében bemutatott mennyiségek: sebesség-eloszlás, izotrópia-arány, turbulencia-intenzitás, turbulens kinetikus energia, disszipációs ráta, disszipációs-konstans, Kolmogorov-hosszlépték, Taylor-Reynolds-szám, továbbá a turbulencia energiaspektruma. A légsugaras ráccsal végzett mérések s azok eredményei a Szaszák et al. 2018b folyóiratcikkekben lettek publikálva.

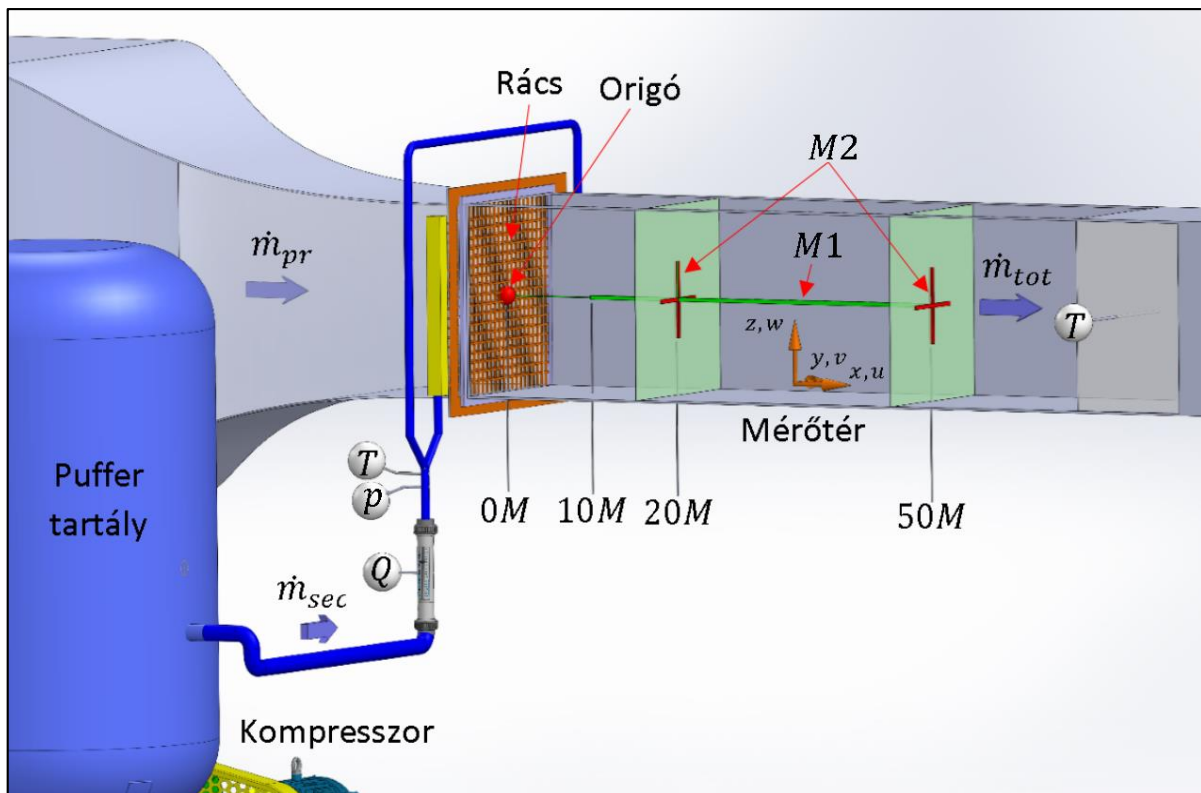
##### 8.4.1. A mérési összeállítás

A rácsot a Tanszéki laboratóriumban található 500×500 mm-es keresztmetszetű, 1,5 m hosszúságú mérőtérrel rendelkező Göttingen-típusú szélcsatornában vizsgáltam. Habár a szakirodalom alapján a vizsgált áramlásban kialakuló anizotrópia csökkentése céljából érdemes a rácsot a mérőtér előtti konfúorzszakaszba beépíteni (Townsend, 1954; Comte-Bellot & Corrsin, 1966; Antonia et al., 2010), ezt egyrészt a rács méretei, másrészt pedig az egy egységből álló konfúorzszakasz nem tették lehetővé. Így tehát a vizsgált rács a konfúorzszakasz és a mérőtér csatlakozási felületei közé lett beépítve olyan módon, hogy az áramlási térben csupán a rácselemek helyezkedtek el, továbbá az aktív elemek az alapáramlás felőli oldal felé néztek (Gad-el-Hak & Corrsin, 1974 alapján). Annak ellenére, hogy a szélcsatorna eredendően zárt rendszerű, a vizsgálatok nyitott rendszerben, kifúvó módban történtek. A mérőtértől távol, a visszatérő ágban a csatorna egy rövid szakaszát eltávolítva nyitottuk meg a csatornát. Ennek az volt a célja, hogy aktív esetben a működtetéshez szükséges préslevegővel bevitt hő ne okozhasson folyamatos léghőmérséklet-növekedést a csatornában, továbbá az állandó



térfogatáram fenntartásához sem lett volna egyszerűen megoldható a kompresszor levegőigényének a szélcsatornában keringtetett levegőből való fedezése.

A vizsgálatokat az előzetesen sebesség-, és iránykalibrált kétkomponensű CTA-szondával (55R51) végeztem (M3 és M9 melléklet). A mérések a szélcsatorna mérőterének középvonalában, a rácstól mért  $10 \div 50M$  távolságtartományban, négy különböző átlagsebesség esetén ( $U_{ref}$ ) történtek:  $U_{ref}=3$  m/s,  $U_{ref}=4$  m/s,  $U_{ref}=5$  m/s, továbbá  $U_{ref}=6$  m/s. Ahhoz, hogy az adott referenciasebességhez térfogatáram/tömegáram értéket is tudjak rendelni, az ISO 3966:2008 szabványt (sebesség-keresztmetszet módszer) alkalmaztam. Eszerint a vizsgált, négyszögletes áramlási keresztmetszet szabvány által megadott pontjaiban Prandtl-csővel mért nyomáskülönbségből számított pontbeli sebességeknek a megfelelő súlyozásával megkapható a térfogatáram. A méréseket különböző sebességeken ( $U_{ref}=3 \div 10$  m/s), a Prandtl-csővel összekötött Testo 445 típusú digitális mérőműszerrel (főbb adatai az M12 mellékletben) elvégezve megkaptam a referenciasebesség-térfogatáram függvényt, amelyből pedig a referenciasebesség-tömegáram függvényt kalkulálhattam. A függvény meghatározásához a méréseket mind passzív, mind pedig aktív üzemiállapotú rácsmellett is elvégeztem, azonban mivel a rácstól távol,  $x=50M$  távolságban mértem a sebességet, ott mindkét állapot esetén közel megegyező értékpárokat kaptam. Ilyen módon a későbbi vizsgálatok során, aktív rácsmellett lehetséges volt a préslevegő- és a mérőteri levegő tömegáramok arányának a meghatározása. A rácsmellett passzív állapotban a rácspontokra illesztett rugalmas elemek nem mozdítottak, ekkor a rácsmellett Reynolds-számok, ( $Re_M$ )  $M=25$  mm-es jellemző hosszal számolva az átlagsebességeknek megfelelően  $Re_M=U_{ref}M/\nu=4,8 \times 10^3$ ,  $6,4 \times 10^3$ ,  $8 \times 10^3$ , továbbá  $9,6 \times 10^3$  értékre adódtak. A rácsmellett kialakuló áramlás turbulenciájának vizsgálatához összeállított mérőrendszert, annak elemeit, továbbá az egyes mérési eseteket a 44. ábra szemlélteti.



44. ábra A vizsgálatokhoz összeállított mérőrendszer.

A beépített rács aktív elemei kívülről, a rács két oldalán elhelyezett osztó-csőveken (sárga színnel jelölve) keresztül lettek megtáplálva préslevegővel. Egyértelmű volt, hogy aktív üzemi rács esetén úgy hozható létre a lehetőleg leghomogénebb áramlás, ha az aktív elemek közelítőleg megegyező térfogatáramú levegőt lövellnek az alapáramlásba. Előzetes, kvalitatív vizsgálatok rámutattak arra, hogy a leghomogénebb aktív elem működés (megközelítőleg azonos térfogatáramok az egyes csövecskéken) úgy hozható létre a rács teljes felületén, ha a rács két oldalán található osztócsöveket ellenkező végükön (az egyiket alulról, a másikat pedig felülről) táplálom meg. Ekkor ugyanis bármely aktív elemhez közel azonos hosszúságú utat kell megtennie a feléje áramló préslevegőnek, így jó közelítéssel megegyező értékű nyomásvesztés alakul ki, ami eredményeként hasonló értékű térfogatáramok várhatók.

A rács aktiválásához szükséges préslevegőt egy háromdugattyús *BOCK F16/2050NH* típusú kompresszor állította elő, amelyet egy frekvenciaváltóval vezérelt AC motor hajtott meg. A kompresszor jellemző adatai  $n_k=1450$  1/min esetén:  $Q_{max,k}=178,4$  m<sup>3</sup>/h, továbbá  $p_{g,max,k}=25$  bar. A préslevegő-térfogatáram egyenletesebbé tétele, továbbá a nyomáslengések kiküszöbölése céljából egy  $V_p=0,315$  m<sup>3</sup> gázterű puffertartály lett a rendszerbe építve. A rácsot megtápláló préslevegő referencianyomása az osztócsövekhez csatlakoztatott csőszakaszok találkozásánál, egy Y-elágazásnál lett mérve. A nyomás méréséhez egy *Testo 445* típusú digitális nyomásmérő műszert alkalmaztam a hozzá csatlakoztatott *0638.1645* referenciaszámú nyomásmérő szenzorral (főbb adatait az **M13** melléklet tartalmazza). Az aktív-rács mérések során minden esetben 0,5 bar-os préslevegő-túlnyomást állítottam be, mivel ekkora nyomáson az összes rugalmas elem aktívan mozgott. Ennek kivitelezése a kompresszor fordulatszámának változtatásával történt meg. A préslevegő térfogatáramát ( $Q_{sec}$ ) egy, az Y-elágazás előtt bekötött *LZT G-25* ( $Q_{max,r}=160$  m<sup>3</sup>/h) típusú rotaméter segítségével mértem (**M14** melléklet). Ahhoz, hogy a leolvasott térfogatáram-értéket korrigálhassam (VDE, 1971), a préslevegő hőmérsékletét is mérnem kellett. Ehhez *TECPEL DTM-800* típusú digitális hőmérőt alkalmaztam K-típusú hőelemmel (**M15** melléklet), amelyet nyomásmérés-megcsapolás után építettem be. Így tehát a préslevegő nyomásának, hőmérsékletének és térfogatáramának mérésével meghatározhattam annak tömegáramát ( $\dot{m}_{sec}$ ) is.

Mind a passzív mind pedig az aktív mérési sorozat azonos CTA-mérőrendszer, s azonos paraméter-beállításokkal lett elvégzve. A mérésekhez a már említett, rendelkezésemre álló *55R51* típusú kétkomponensű szondát alkalmaztam (**M3** melléklet). A későbbi eredmények alapján az aktív szenzor-hossznak a Kolmogorov-hosszléptékekhez viszonyított aránya 6,6 ( $x/M=10$ ) és 3,9 ( $x/M=50$ ) határok között változott, hasonlóan más szakirodalomban közzétett adatokhoz (Valente & Vassilicos, 2011); azonban belátható, hogy a kisebb arányszám pontosabb mérési felbontást tesz lehetővé (Burattini et al., 2008; Antonia et al., 2010). A méréseket megelőzően az alkalmazott szonda sebesség- (1-10 m/s), és iránykalibrációját is elvégeztem a pitch-yaw manipulátorral ellátott *DANTEC Dynamics StreamLine Pro* típusú (**M4** melléklet), számítógép vezérlésű kalibrátor-egységgel. A CTA rendszer vezérlőszoftverébe beépített négyzögjel-teszt segítségével határoztam meg a rendszer frekvenciaválasztát, ami alapján az  $f_s=20$  kHz mintavételezési frekvenciát választottam a mérések során, továbbá ehhez 10 kHz-es aluláteresztő szűrőt állítottam be. Az adatgyűjtés ebben az esetben is szintén a már ismertetett *NI MIO 16 bit A/D* átalakítóval történt. A szonda túlfűtési-arányát (overheat ratio) 0,8-as értékre választottam csakúgy, mint Gad-El-Hak & Corrsin (1974), Verbeek (2013), vagy Weitemeyer et al. (2013); azonban az ide vonatkozó szakirodalomban ettől kisebb s nagyobb értékekre is egyaránt van példa: Lavoie et al. (2004): 0,5; Larssen et al. (2011):1,7; Knebel & Peinke (2009):1,8.

Csakúgy, mint a szalagos rács mérési összeállításánál, ez esetben is az ott alkalmazott traverzrendszeren volt elhelyezve a mérőszonda. Azonban ennél az összeállításnál – a szélcsatorna adottságai, továbbá az áramlás minél kisebb mértékű megzavarása céljából – a csatorna mérőterének oldalfalát kellett úgy átalakítani, hogy azon keresztül lehessen pozicionálni s mozgatni a szondát. Ezért azon egy előre definiált pályát alakítottam ki, amelyen keresztül a szondatartó kar benyúlhatott a mérőtérbe. A tömítettség fenntartása érdekében rugalmas szivacs elemekkel a kimart pálya tömítésre került. Ezen elemek szorosan körülölelték az aktuális pozícióban lévő tartókart. A kar végén egy 90°-os könyököt követően oly módon rögzítettem a szondát, hogy segítségével az alapáramlás irányú  $u$ , továbbá az arra merőleges, vízszintes irányú  $v$  pillanatnyi sebességkomponenst tudtam mérni (lásd 44. ábra). A rács után kialakuló áramlásra – a rács szimmetriájából adódóan – jellemző a rács síkjával párhuzamos sebességkomponensek lokális izotrópiája ( $i \approx 1$ ), tehát azok szórásértékei jó közelítéssel azonosnak vehetők ( $v_{sd} \approx w_{sd}$ ). Ezt a feltételezést tehát ennél a típusú rácsnál is alkalmaztam az egyes turbulencia-jellemzők meghatározásához.

Miként az a 44. ábra mérési összeállításán is látható, a mérőtérben két mérési sorozat, M1 és M2 lett definiálva, amelyek segítségével az áramlás más-más jellemzőit lehetett meghatározni:

- M1: az áramlás turbulencia-jellemzőinek alakulását a ráctól mért távolság függvényében vizsgáltam  $U_{ref}=3$  m/s; 4 m/s; 5 m/s, továbbá 6 m/s referenciasebesség-értékek mellett. A mérőpontokat az áramlási tér középvonalában, a ráctól mért  $x=10M$ -tól  $50M$  távolsáig,  $5M$  lépésközökkel vettem fel, így összesen 9 mérési pontot (a 44. ábrán zöld vonallal jelölve) vizsgálhattam. Minden mérési pontban  $t_s=60$  s ideig történt az adatgyűjtés  $f_s=20$  kHz-es mintavételi frekvencián.
- M2: a rácsot követően kialakuló áramlás homogenitásának vizsgálata céljából a ráctól mérve két távolságban, azzal párhuzamos síkokban ( $x=20M$  és  $x=50M$ ), mind a vízszintes ( $y$ ), mind pedig a függőleges ( $z$ ) középvonalakban végeztem méréseket. Mindegyik vonal esetén a középső 200 mm szélességű részt vizsgáltam,  $1M$  lépésközzel (a 44. ábrán piros keressztekkel jelölve). Minden mérési pontban  $t_s=60$  s ideig történt az adatgyűjtés  $f_s=20$  kHz-es mintavételi frekvencián, azonban e mérések esetén  $U_{ref}=4$  m/s referenciasebesség volt beállítva mind passzív mind pedig aktív esetben.

A szélcsatorna mérőtere után, a ráctól mérve  $x=77M$  távolságban (lásd a 44. ábrán) egy *Testo 445* típusú műszerrel mértem az áramló közeg hőmérsékletét (**M16** melléklet). Ezen túlmenően a mérések során a légköri nyomást is dokumentáltam egy *Druck DPI 145* típusú digitális barométerrel (**M17** melléklet). Az általa mért abszolút nyomás közel megegyezett a csatorna mérőterében áramló levegő nyomásával, mivel a csatorna kifúvó módban üzemelt, s az áramlási sebesség alacsony volta miatt eltekinthettem a nyomásvesztéstől. E mennyiségek ismeretében meghatározhattam a mérőtérben kialakuló áramlás tömegáramát,  $\dot{m}_{tot}$ -ot is. Ezen túlmenően a rács aktív állapotában a préslevegő jellemzőinek mérése segítségével (nyomás, hőmérséklet, térfogatáram) meghatározhattam a préslevegő tömegáramát. Ez a rendszer állandósult állapota esetén  $\dot{m}_{sec} = 140$  kg/h értékre adódott a frekvenciaváltó segítségével az Y-elágazásnál beállított 0,5 bar túlnyomás esetén. A mérések alatt ezt az értéket  $\pm 1,1$  kg/h ingadozással tudta tartani a rendszer, ami kevesebb, mint 0,8% relatív ingadozást jelent. Ennek ismeretében, továbbá a mérőtér teljes tömegáramának ( $\dot{m}_{tot}$ ) meghatározása után egy fontos, az aktív rácsot jellemző paramétert, a tömegáram-arányt határozhattam meg. E jellemzőt a  $\varphi = \dot{m}_{sec} / \dot{m}_{tot}$  összefüggéssel definiáltam. Ez tehát az aktív üzemi rácsra jellemző paraméter, s értéke a vizsgált, növekvő referenciasebességek ( $U_{ref}=3, 4, 5$  és 6 m/s) esetén:  $\varphi=4,1\%$ ;  $3,2\%$ ;

2,6%; 2,2%. Az értékekből látható, hogy a hozzávezetett préslevegő még a legkisebb,  $U_{ref}=3$  m/s sebesség esetén is csupán a teljes mérőtér-áramlás 1/25 részét, azaz csak néhány százalékát teszi ki, s ez az érték nagyobb referenciasebességek esetén tovább csökken. E paraméter egy újabb rendszer tervezésénél a szükséges kompresszor-teljesítmény számításához, továbbá zárt rendszer esetén a csatornából elvezetendő levegő mennyiségének számításához is fontos információval szolgálhat.

#### 8.4.2. A passzív és az aktív rendszer esetén kalkulált áramlási jellemzők összehasonlítása

Csakúgy, mint a szalag-rács vizsgálatánál, ez esetben is számos, az áramlásra jellemző mennyiséget határoztam meg. A vizsgálatok elsődleges célja a rács passzív és aktív állapotai során létrehozott áramlás paramétereinek összehasonlítása, elemzése volt. Ezért a következőkben bemutatásra kerülnek az izotrópiát és az áramlás homogenitását leíró paraméterek, amelyeket az M2 mérésorozat adataiból származtattam. Továbbá magát a turbulenciát jellemző mennyiségek értékeit is bemutatom, amelyek alakulását a rácstól mért távolság függvényében szemléltetem. Ezeken túlmenően a turbulens kinetikus energia spektrális eloszlását is ismertetem, összehasonlítva a passzív, s az aktív állapot eredményeit.

##### *Izotrópia és homogenitás*

Ahhoz, hogy meghatározhassam a rács után kialakuló áramlás jellemzőinek a rács síkjával párhuzamos térbeli eloszlását, az M2-es mérési sorozat eredményeit elemeztem, ahol a vízszintes ( $y$ ) és a függőleges ( $z$ ) középvonalakban vizsgáltam a jellemzőket a mérőtér középső  $200 \times 200$  mm-es ( $8M \times 8M$ ) részében. Ebben a mérési sorozatban  $U_{ref}=4$  m/s referenciasebességet állítottam be passzív és aktív esetben is. Az egyes vonalakban s rács-állapotokban kapott izotrópia-arány értékek ( $i$ ) átlagait ( $i_m$ ), továbbá azok szórásait ( $i_{sd}$ ) a 8.2 Táblázat tartalmazza. Az értékek alapján tett következtetések előtt fontos ismét megjegyezni, hogy a rács közvetlenül a mérőtér előtt, konfúorzszakasz hozzáépítése nélkül lett vizsgálva.

8.2 Táblázat: az izotrópia-arányok átlagai és szórásai

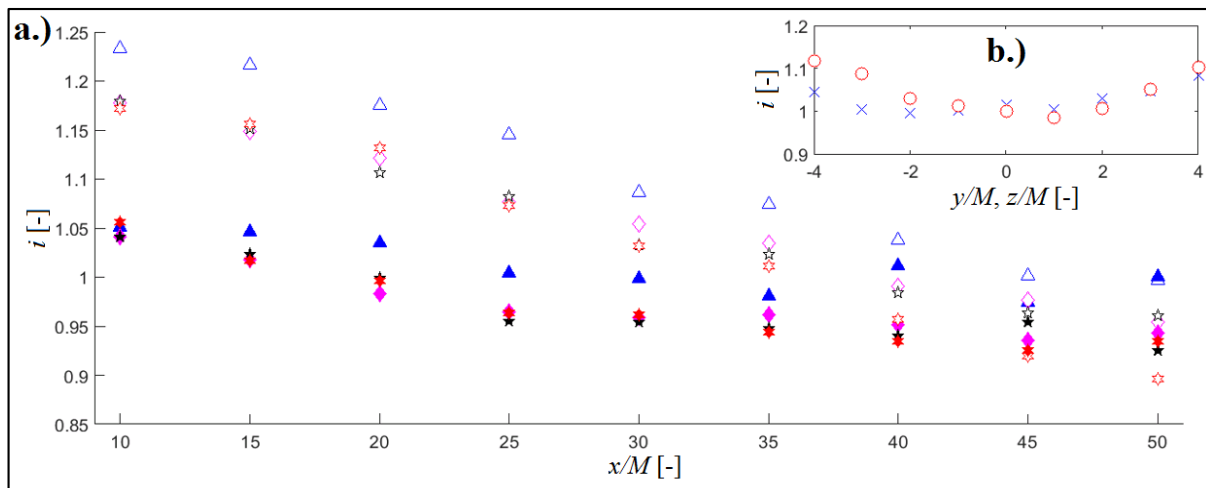
	$i_{m,20M}$ [-]	$i_{m,50M}$ [-]	$i_{sd,20M}$ [%]	$i_{sd,50M}$ [%]
Passzív eset	1,14	0,99	3,0	5,1
Aktív eset	1,03	0,97	4,0	3,7

A táblázat alapján több megállapítás is tehető. Egyrészt látható, hogy a vizsgált rács esetében, függetlenül annak üzemállapotától, a távolsággal együtt csökken az átlagos izotrópia-arány. Ez a rácsokra jellemző jelenség, amelyet szakirodalmi adatok is alátámasztanak (Gad-el-Hak & Corrsin, 1974; Makita, 1991; Kang et al., 2003). Ezen túl látható az is, hogy a rács aktiválása mindkét távolság esetén kisebb értékeket eredményezett,  $20M$  távolságban több, mint 10%-kal csökkent az átlagos anizotrópia. Azonban az is megfigyelhető, hogy a rácshoz közelebb 1%-kal nőtt az izotrópia-értékek szórása a rács aktiválása miatt, amely tendencia megfordult az  $x=50M$  távolságnál: ott 1,4%-kal csökkent a szórás. Az adatokat szakirodalmi eredményekkel összevetve elmondható, hogy azokhoz közelítőleg hasonló értékek adódtak. Például Kang et al. (2003) cikkükben  $i_m=1,14$ -es értékről számoltak be  $x=40M$  távolságban

aktív rács esetén. Gad-El-Hak & Corrsin (1974) a légsugaras-rács kísérletükben, aktív rács esetén  $i_m=1,11$ -es értékű izotrópia-arányt mértek a rácstól  $46M$  távolságban. Makita (1991) a mechanikusan mozgatott aktív elemes rácsával  $i_m=1,19$ -es értéket ért el passzív esetben, azonban  $1,22$ -es értéket kapott a rács aktiválását követően,  $50M$  távolságban a rácstól. Természetesen az általam elvégzett mérések esetén az aktív állapothoz tartozó értékek kaptak fontosabb szerepet. Megállapítható, hogy a rács aktiválása hatására már a rácshoz közeli  $20M$  távolságban is csökkentek az adott távolsághoz tartozó izotrópia-értékek, így tehát a rács aktiválása pozitív hatással van az áramlás izotrópiájának alakulására.

Az  $U_{ref}=4$  m/s és az  $x/M=20$  távolságban végzett mérések izotrópia-értékeinek vonal menti eloszlását szemlélteti a 45. ábra b.) része, amely Larssen & Devenport (2011) Makita-féle, forgó lapátokat tartalmazó aktív rács-kísérletének publikált eredményeihez hasonlóan a vizsgált keresztmetszet széleinek közelében jellemzően egységnyitől nagyobb értékeket mutat. Az általam vizsgált, aktív üzemállapotú rács esetén mért értékek függenek mind az  $y$  mind pedig a  $z$  pozíciótól. Ennek magyarázata az lehet, hogy az általam legjobbnak feltételezett átlós irányú levegőmegáramlás sem eredményezett tökéletesen azonos kiáramlási sebességeket az egyes csövecskéken, azonban ennek kvantitatív ellenőrzésére nem volt lehetőségem.

Az izotrópia-arány értékeket nem csupán a ráccsal párhuzamos vonalak mentén, hanem a rácstól mért távolság függvényében, a mérőtér középvonalában is vizsgáltam az  $x=10M \div 50M$  intervallumban (M1-es mérési eset). A kalkulált értékeket passzív és aktív esetben, mind a négy referenciasebesség esetén szemlélteti a 45. ábra a.) része.

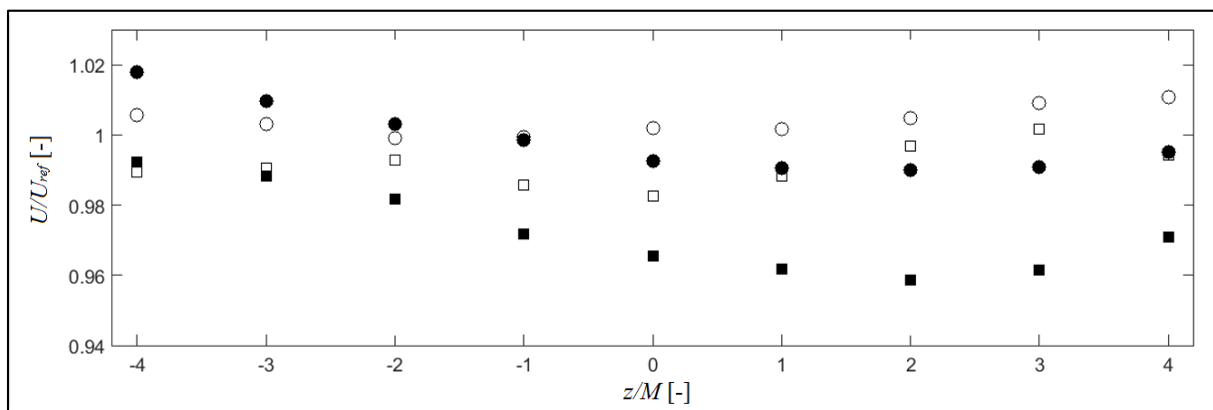


45. ábra Az izotrópia-arány ( $i$ ) passzív és aktív esetben. a.) a mérőtér középvonalában mért eredmények a rácstól mért távolság függvényében; b.)  $x/M=20$  távolságban,  $U_{ref}=4$  m/s sebességnél, aktív üzemű rács esetén kapott értékek  $y$  ( $\times$ ) és  $z$  ( $\circ$ ) irányokban. Jelmagyarázat: üres jelölők: passzív eset, teli jelölők: aktív eset. Háromszög:  $U_{ref}=3$  m/s; négyszög:  $U_{ref}=4$  m/s; pentagram:  $U_{ref}=5$  m/s; hexagram:  $U_{ref}=6$  m/s.

A 45. a.) ábra alapján látható, hogy az izotrópia-értékek a távolsággal együtt csökkennek csakúgy, mint ahogy arról Kang et al. (2003) cikkükben beszámoltak a Makita-féle rács vizsgálatánál. Megfigyelhető, hogy a rács aktiválása szisztematikusan alacsonyabb izotrópia-értékeket eredményezett a rácshoz közel, azonban a legtávolabbi mérési pontokban már nem látható egyértelmű különbség az egyes esetek között.

Mivel számos szélcsatorna kísérlet feltétele az igen jó közelítéssel homogénnek és izotrópnak nevezhető, rács után kialakuló turbulencia, ezért fontos, hogy magának a sebességmezőnek is megvizsgáljuk a homogenitását, hiszen ez szükséges feltétele a turbulencia

homogenitásának. Az áramlás inhomogenitására a pontbeli időátlagolt sebesség ( $U$ ) és a referenciasebesség ( $U_{ref}$ ) arányának terjedelme jellemző, amennyiben ezt a mennyiséget a rács síkjával párhuzamos irányokban vizsgáljuk (esetemben az M2-es mérési sorozatban). A szakirodalomban fellelt korábbi légsugaras-rács kísérletek eredményei rámutattak arra, hogy aktív rács esetén az inhomogenitás igen széles tartományban változik. A legkisebb, 5%-os értéktől (Gad-el-Hak & Corrsin, 1974), ahol egyenként beállított légsugár-erőségekkel érték el igen magas homogenitást, a talán legmagasabb, dokumentált, 30%-os értékig (Luxenberg & Wiskind, 1969) terjed ki a skála. E határokon belüli értékekről számolt be többek között Liu et al., 1971: 10%, továbbá Teunissen (1969) és Mathieu & Alcaraz (1965) 15%-os értéket publikáltak. Mindezt én  $U_{ref}=4$  m/s esetén vizsgáltam az M2 mérési sorozat ( $x=20M$  és  $x=50M$ ) eredményeit feldolgozva. A referenciasebességhez viszonyított, függőleges vonal ( $z$ ) mentén mért pontbeli átlagsebesség-értékeket a 46. ábra szemlélteti a rács mindkét üzemi állapotában.



46. ábra Az áramlás homogenitása: a pontbeli átlagsebességek referenciasebességhez viszonyított aránya. Jelmagyarázat: üres jelölők: passzív eset, teli jelölők: aktív eset. Négyzet:  $x/M=20$ ; kör:  $x/M=50$ .

A 46. ábrán megfigyelhető, hogy a szakirodalomban leírtakhoz hasonlóan a rács aktiválása némileg nagyobb eltéréseket okoz a pontbeli átlagsebességek értékeinél (teli jelölők), tehát az aktív esethez valamelyest nagyobb inhomogenitás társítható, főleg a rácshoz közelebbi vonalban. A vizsgált távolságokban, passzív és aktív üzemi állapotokban számolt homogenitási-értékek ( $U/U_{ref}$ ) átlagát, szórását, minimumát és maximumát mutatja a 8.3 Táblázat.

8.3 Táblázat: az áramlás homogenitási-értékei különböző mérési esetekben

üzemi állapot	távolság	$\overline{U/U_{ref}}$	$(U/U_{ref})_{sd}$	$(U/U_{ref})_{min}$	$(U/U_{ref})_{max}$
passzív	$x/M=20$	0,991	0,0058	0,983	1,002
	$x/M=50$	1,00	0,0041	0,999	1,011
aktív	$x/M=20$	0,973	0,0123	0,959	0,992
	$x/M=50$	0,999	0,0098	0,990	1,018

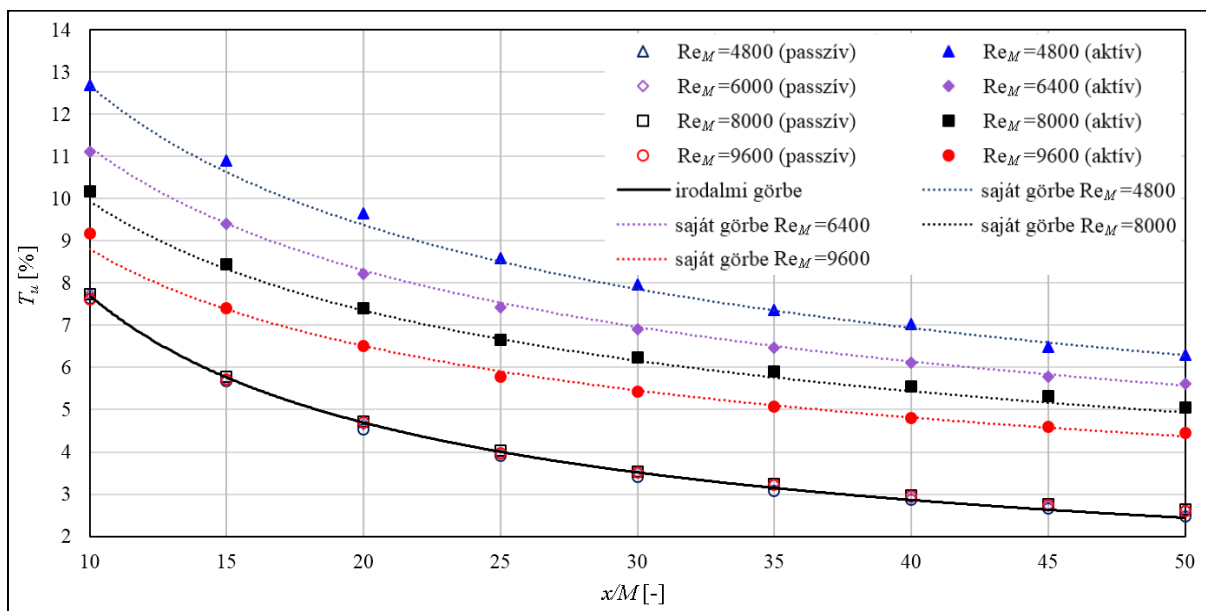
A 8.3 Táblázatban közölt adatok alapján látható, hogy a távolság növelésével együtt mindkét üzemi állapotban javult az átlagos homogenitás, miközben a szórásértékek is csökkentek. Azonban az aktiválás hatására mindkét távolságban csökkentek némileg az átlagértékek, mindazonáltal a szórásértékek növekedtek. Habár a rács aktiválása némileg növeli az áramlás inhomogenitását, még így is sok irodalmi adattól kisebb érték adódott, amely alapján a vizsgált tartományban megfelelően homogénnek tekinthető mind az áramlás, mind pedig a turbulencia.

## Turbulencia-intenzitás

Az M1 mérési sorozat alapján kapott alapáramlás irányú turbulencia-intenzitás értékeket ( $T_u$ ) szemlélteti a 47. ábra. Az ábra alapján megállapítható, hogy passzív üzemállapotú rács esetén (üres jelölők) a ráctól adott távolságban jó közelítéssel azonos értékeket kaptam, függetlenül a beállított referenciasebességtől (itt: rács-Reynolds számtól); tehát passzív esetben a turbulencia-intenzitás nem függ az áramlás rács-Reynolds számától. Továbbá ezek az értékek messze az aktív állapothoz tartozó értékek alatt helyezkednek el: passzív esetben csupán 2,5%-tól 7,7%-ig terjedő értékek adódtak. A passzív állapotban – egy-egy távolsághoz tartozó – egymásra eső adatpontok egyébként a szakirodalom által leírt jelenséget támasztják alá (Roach, 1987), ugyanis passzív négyzög-rácsok esetén a rács után kialakuló turbulencia-fok megadható a

$$T_u = 1,13 \cdot (x/D)^{-5/7} \quad (8.19)$$

empirikus függvénnyel. Ebben  $D$  a rácsselem vastagsága. Ezen összefüggésben nem szerepel az áramlási sebesség, így passzív esetben a turbulencia-fok nem lehet az áramlási sebesség (ekképp a rács-Reynolds szám) függvénye. Az általam vizsgált rács passzív üzemében is jelen voltak a csövecskék, amelyek kimutathatóan hatással voltak a turbulencia-fokra. Ezért az adatpontokra legjobban illeszkedő szakirodalmi görbe esetén – a valós  $D=5$  mm rácsselemvastagság helyett – a  $D^*$  virtuális rácsselemvastagságot helyettesítettem be a (8.19) összefüggésbe. Ennek – a legkisebb négyzetek módszerén alapuló – legjobb közelítést adó értéke  $D^*=5,82$  mm-re adódott. A  $D^*$  így figyelembe veszi a nyugvó csövekből adódó járulékos takarást. A  $D^*$ -gal módosított összefüggéssel kapott görbét a 47. ábrán tüntettem fel (irodalmi görbe).



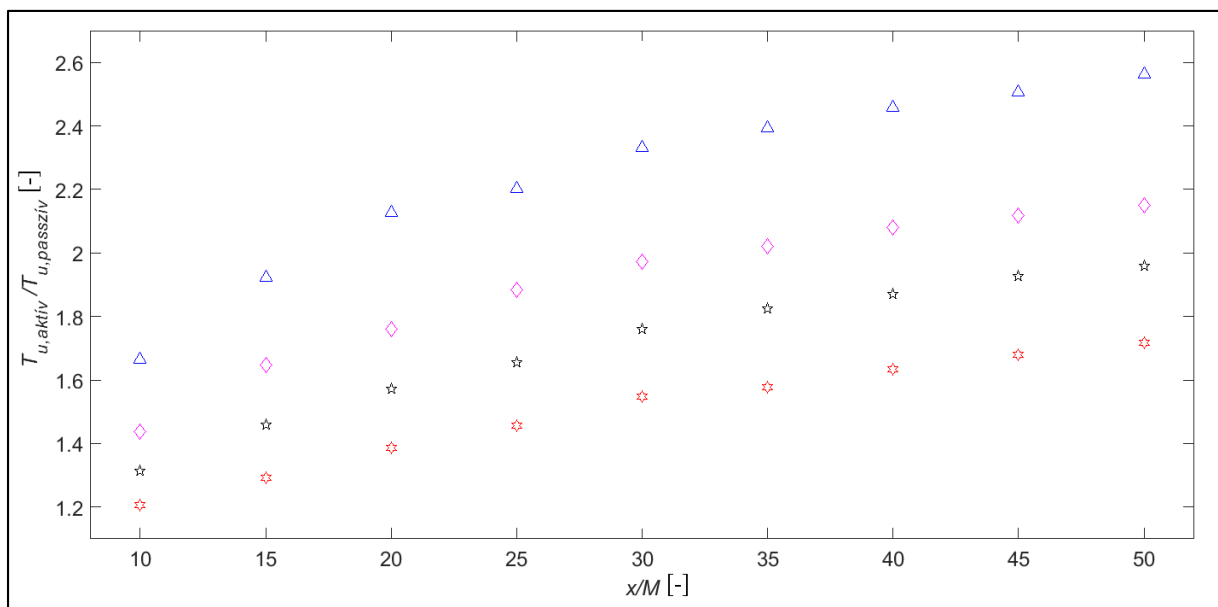
47. ábra A passzív üzemű (üres jelölők) és az aktivált rács (teli jelölők) esetén mért  $T_u$  értékek a ráctól mért távolság függvényében. Görbék: a passzív esethez tartozó adatpontokra fektetett szakirodalmi görbe (folytonos vonal) és az aktív üzemre jellemző, saját empirikus összefüggésből adódó görbék (pontvonal).

A passzív üzemben kapott eredményektől az aktív állapot eredményei több szempontból is eltérnek. A vizsgált aktív esetekben a megfelelő passzív állapothoz képest jelentősen nagyobb

értékek adódtak, aminek oka egyrészt az ellenáramban kilövellt légsugarak okozta megnövekedett nyomásesés, továbbá a mozgó elemek általi „virtuális ellenállási-tényező” növekedése lehet. Mint az látható, az aktív állapotban kialakuló turbulencia-fok nagymértékben függ az átlagsebességtől ( $Re_M$ -től), hiszen az egyes vizsgált sebességeken kapott értékek nem esnek egybe a vizsgált  $x/M$  intervallumon, azonban az adott távolsághoz tartozó értékek közötti abszolút különbségek együtt csökkennek a távolsággal. Látható, hogy a legkisebb átlagsebesség esetén kaptam a legmagasabb turbulencia-fok értékeket, míg a legnagyobb sebesség esetén a legkisebbeket, azonban még ezek is a megfelelő passzív-eredményektől magasabb értékűek voltak. Például  $U_{ref}=6$  m/s esetén a turbulencia-fok értékek 4,5%÷9,2%-os tartományban változtak, miközben 6,3%÷12,7%-os intervallum adódott kisebb,  $U_{ref}=3$  m/s esetén. Tehát a rács aktív állapotában az átlagsebesség jelentős hatással van a kialakuló turbulencia-intenzitásra. A passzív rácsoknál alkalmazott szakirodalmi összefüggéshez hasonló, de a rács-Reynolds-számot is figyelembe vevő összefüggést kerestem, amely a legjobban jellemzi a vizsgált aktív esetek eredményeit. A vizsgálataim eredményeként – az összes aktív üzem esetén – a legjobb közelítést adó összefüggés

$$T_u(Re_M) = e^{-7,6 \cdot \left(\frac{Re_M}{10^5}\right)} \cdot \left(\frac{x}{D}\right)^{-10/23} . \quad (8.20)$$

formában adódott. Az összefüggés tehát figyelembe veszi az áramlási sebességgel arányos rács-Reynolds számot, továbbá az eredményül kapott görbe meredeksége a passzív rácsoknál alkalmazott  $-5/7$  ( $\approx -0,714$ ) helyett  $-10/23$  ( $\approx -0,435$ ) értékre adódott a vizsgált mérési intervallumban. Az egyes rács-Reynolds-számú aktív esetekhez tartozó adatokra fektetett görbék láthatók a 47. ábrán. Ezen eredmények alapján tehát megállapítható, hogy a vizsgált, aktív elemekkel ellátott légsugár-rács képes jelentősen növelni az áramlás turbulenciáját, amely növekedés kisebb referenciasebességeken még szignifikánsabb. Az aktiválás hatását számszerűsíthetjük, s ekképp még szemléletesebbé tehetjük úgy, ha meghatározzuk az egyes összetartozó aktív és passzív turbulencia-fok értékpárok arányát, amit a 48. ábra szemléltet.



48. ábra Az aktív és a passzív esethez tartozó  $T_u$  értékpárok aránya. Háromszög:  $U_{ref}=3$  m/s; négyszög:  $U_{ref}=4$  m/s; pentagram:  $U_{ref}=5$  m/s.

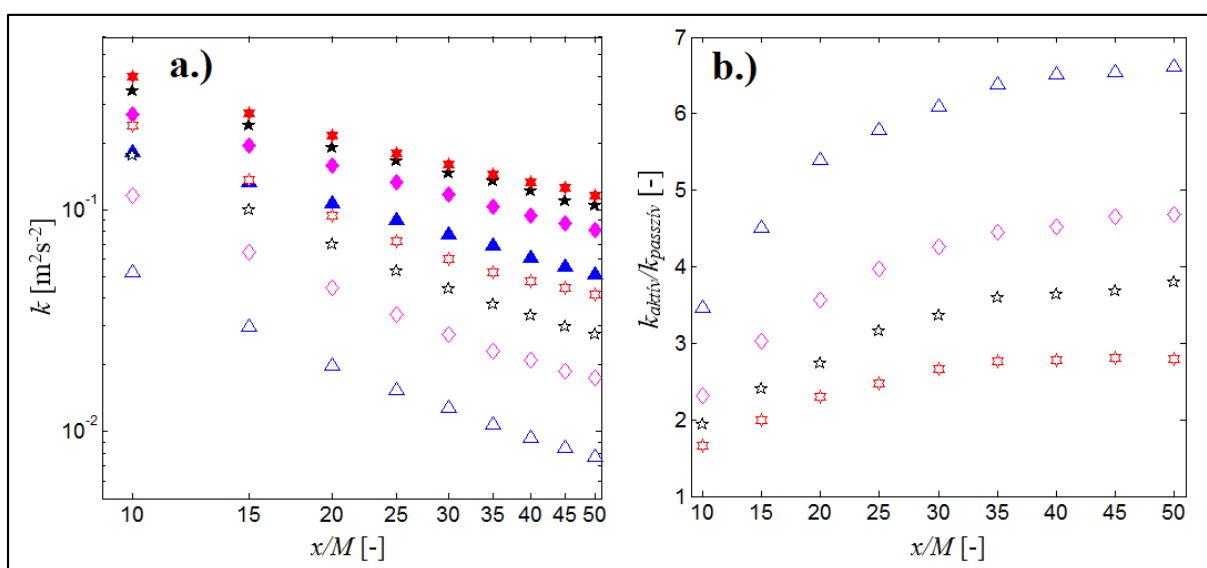


Az ábra alapján megállapítható, hogy a legkisebb sebesség esetén kapható a legnagyobb mértékű növekedés, amely – az összes vizsgált sebesség esetén – a távolsággal együtt nő. Az aktiválás 1,2-szeres legkisebb és 2,6-szoros maximális növekedést okozott a vizsgált esetekben.

A kialakuló turbulencia homogenitásának vizsgálata érdekében a turbulencia-fok alakulását a rácstól mért fix távolságokban is megvizsgáltam (M2-es mérési sorozat,  $x=20M$  és  $x=50M$  távolságban). Passzív módban a vízszintes ( $y$ ) és függőleges ( $z$ ) vonalakban kapott  $T_u$  értékek szórása 0,053-ra adódott  $20M$  távolságban, továbbá 0,04-et kalkuláltam  $50M$  távolságban. Aktív esetben ezen értékektől valamelyest nagyobbak adódtak, igazolva az előző részben bemutatott tendenciákat:  $x=20M$  esetén 0,168;  $x=50M$  távolságban ettől valamelyest kisebb, 0,166-os szórásértéket kaptam.

### Turbulens kinetikus energia

A turbulens kinetikus energia talán a legfontosabb turbulenciát jellemző skaláris paraméter. Ennek pontos számításához a méréseim során a kétkomponensű CTA szonda alkalmazásával mért  $u$  és  $v$  pillanatnyi sebességkomponenseken túl a harmadik, függőleges irányú sebességkomponens ( $w$ ) idősorának ismeretére is szükség lenne. Ennek hiányában a rácturbulenciára jellemző feltételezéssel itt is éltem ( $v_{sd} \approx w_{sd}$ ), így az előzőekben már definiált 4.11 összefüggéssel számíthattam ki a turbulens kinetikus energiát. E mennyiség alakulását mutatja a 49. a.) ábra a rácstól mért távolság függvényében. Az előzőekben bemutatott turbulencia-fokkal ellentétben passzív üzemállapotú rács esetén a turbulens kinetikus energia jelentősen függ az áramlás referenciasebességétől: nagyobb sebességekhez rendre nagyobb értékek tartoznak, miként azt passzív-rács témájú munkáikban Kurian & Fransson (2009) és Danesh-Yazdi et al. (2015) is bemutatták. E jelenségnek az oka a mennyiség definíciójában rejlik, hiszen itt nem szerepel az átlagsebesség, mint a normalizáláshoz használt osztótényező, viszont nagyobb sebességeken jellemzően nagyobb szórásértékek adódtak. Emellett látható, hogy a rács aktiválása az összes vizsgált sebesség és pozíció esetén jelentős mértékben növelte  $k$  értékét.

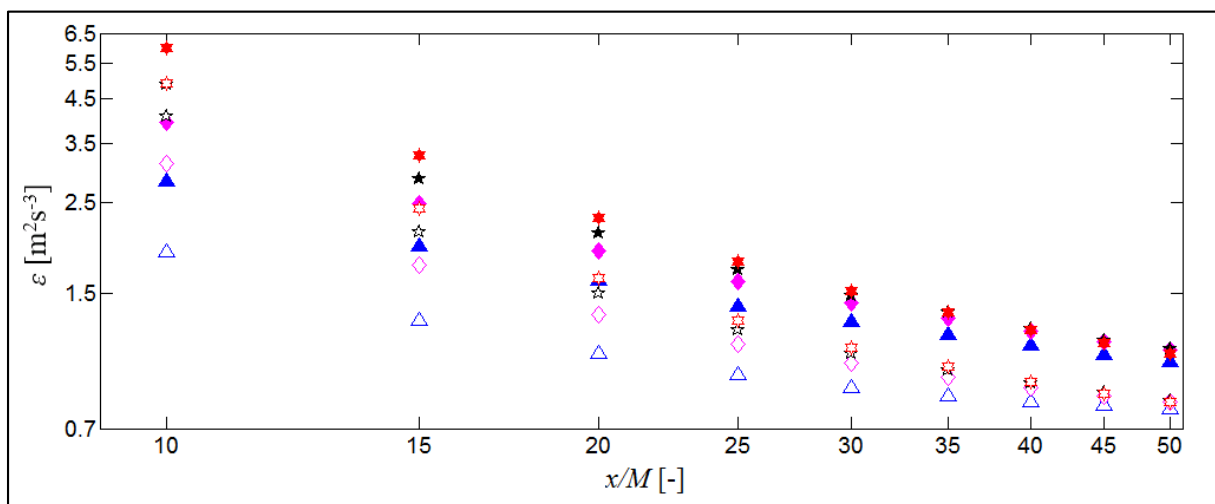


49. ábra a.) A turbulens kinetikus energia alakulása a rácstól mért távolság függvényében (log-log skála). Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. b.) Az aktív és a passzív értékpárok aránya. Háromszög:  $U_{\text{ref}}=3$  m/s; négyszög:  $U_{\text{ref}}=4$  m/s; pentagram:  $U_{\text{ref}}=5$  m/s; hexagram:  $U_{\text{ref}}=6$  m/s.

Csakúgy, mint a turbulencia-intenzitás esetében, az aktiválás hatásának kvantitatív jellemzéséhez itt is meghatároztam az összetartozó aktív és passzív értékpárok arányát, amelyet a 49. b.) ábra mutat be. Ez alapján megállapítható, hogy a vizsgált tartományokban a távolsággal együtt monoton nő az energianövekedés aránya, habár – a távolsággal együtt csökkenő meredekség miatt – feltételezhetően nagyobb távolságnál egy aszimptotikus értékhez közelít az arányszám. Emellett a  $T_u$  alakulásához hasonlóan szintén a legkisebb,  $U_{ref}=3$  m/s sebesség esetén volt a rácshoz a legszignifikánsabb energianövelő hatása: a legnagyobb vizsgált távolságban közel 6,5-szeres turbulens kinetikus energia adódott. Ezek az eredmények ismét bizonyítják a rác-konceptió működőképességét: alacsony sebességű alapáramlás esetén – a passzív üzemállapotú rácshoz képest – jelentős energiájú turbulencia hozható létre.

### Disszipációs ráta

A turbulens kinetikus energia disszipációs rátája ( $\varepsilon$ ) az alapdefiníciója szerint nem más, mint az alapáramlás sebességével együtt haladó rendszer egy pontjában a turbulens kinetikus energia idő szerinti deriváltjának negált értéke, ahogy azt már a 4.1-es alfejezetben bemutattam (4.12 összefüggés). Azonban mivel nem ismert  $k$  időfüggvénye, sem mindhárom sebességkomponens, ezért meghatározásához Taylor fagyott-örvény hipotézisét kell alkalmazni, továbbá lokális izotrópiát ( $i \approx 1$ ) szükséges feltételezni. Ezek figyelembevételével a turbulencia spektrális energia-eloszlásából becsülhető meg a disszipációs ráta, a 4.13 összefüggés alapján. A passzív és az aktív esetekben kalkulált  $\varepsilon$  értékek a rácstól mért távolság függvényében, log-log skálán az 50. ábrán tekinthetők meg.

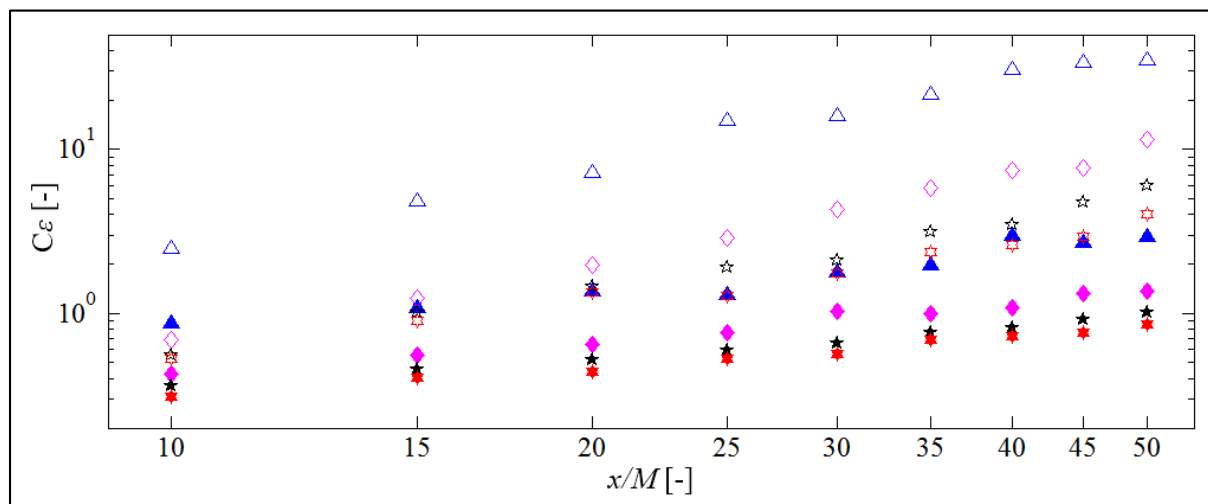


50. ábra A turbulens kinetikus energia disszipációs rátájának ( $\varepsilon$ ) alakulása a rácstól mért távolság függvényében. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. Háromszög:  $U_{ref}=3$  m/s; négyzet:  $U_{ref}=4$  m/s; pentagram:  $U_{ref}=5$  m/s; hexagram:  $U_{ref}=6$  m/s.

Az ábra alapján megállapítható, hogy a rácshoz közelebb mind passzív, mind pedig aktív állapotban nagyobb fokú a disszipáció, amely a rácstól való távolsággal együtt csökken, megerősítve ezzel Kang et al. (2003) eredményeit. Mind passzív, mind pedig aktív esetben elmondható, hogy a referenciasebességnek a rácshoz közelebb nagyobb hatása van  $\varepsilon$  értékére, miközben  $x=50M$  távolsághoz közeledve ez a hatás már nem érvényesül. Az adott, passzív vagy aktív állapothoz tartozó, különböző  $U_{ref}$  sebességek esetén kalkulált értékek közel megegyezők lesznek a távolabbi mérési pontokban, ám a passzív és az aktív esetekben más-más értékek

adódnak. Megállapítható, hogy vizsgálati tartományban a passzív állapothoz viszonyítva minden esetben nagyobb  $\varepsilon$  értékek adódtak a rács aktiválása után.

A szakirodalomban a disszipációs rátával kapcsolatos másik, dimenziótlanított mennyiség is használatos a rács turbulencia jellemzésére, ez az ún. disszipációs konstans ( $C_\varepsilon$ ), amelynek kiszámításához a 4.17 összefüggést alkalmaztam. Ennek értékei ( $x/M$  függvényében) mind passzív, mind pedig aktív esetben jó közelítéssel hatványfüggvény szerint alakulnak, ahogy ez a log-log skálázású 51. ábrán látható.



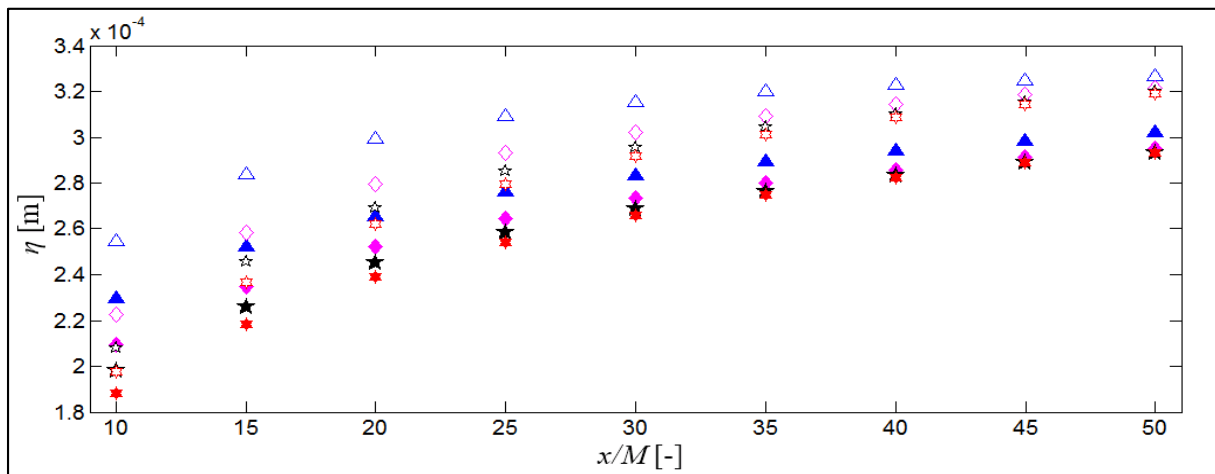
51. ábra A disszipációs konstans ( $C_\varepsilon$ ) alakulása a mérőter közép vonalában, log-log skálán ábrázolva. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. Háromszög:  $U_{ref}=3$  m/s; négyzet:  $U_{ref}=4$  m/s; pentagram:  $U_{ref}=5$  m/s; hexagram:  $U_{ref}=6$  m/s.

Megfigyelhető az ábrán, hogy a passzív esethez tartozó értékek (üres jelölők) szisztematikusan magasabb értékűek, mint aktív esetben. Ezek az észrevételek megegyeznek korábbi, légsugaras-rács kísérletek tapasztalataival. Gad-el-Hak & Corrsin (1974) légsugár nélkül végzett kísérleteikben (passzív eset)  $C_\varepsilon=2,43\div 2,63$  értékekről számoltak be az  $x/M=30\div 46$  intervallumban, miközben az áramlással szemben kilövellt légsugarak esetén (aktív üzemi állapotú rács) ezektől kisebb,  $C_\varepsilon = 1,30\div 1,44$  közötti értékeket publikáltak. Az általam végzett kísérletek alapján a teljes intervallum  $C_\varepsilon=0,31\div 2,99$  között adódott a teljes  $x/M=10\div 50$  tartományon.

### Kolmogorov-hosszlépték

Ahogy azt már a 4.1-es alfejezetben bemutattam, a Kolmogorov-léptékek a turbulens áramlásban jelen lévő legkisebb, disszipatív örvényeket jellemzik. E léptékeket a Reynolds-szám összefüggésébe behelyettesítve éppen egységnyi értékű Reynolds-szám adódik, ami az ilyen méretű örvényekre ható súrlódási és tehetetlenségi erők azonosságát jelenti. Kolmogorov elmélete (Kolmogorov, 1890) alapján ezek a léptékek – függetlenül az áramlás kezdeti feltételeitől, s a nagyobb léptékektől – univerzálisak, s értékeik csupán a kinematikai viszkozitás ( $\nu$ ) és a disszipációs ráta ( $\varepsilon$ ) értékétől függenek (a 4.20-4.22 összefüggések alapján). Mivel a mérések során eltekintettem az áramló közeg hőmérsékletének kismértékű megváltozásából adódó kinematikai viszkozitási tényező változásától, ebből következően a Kolmogorov-léptékek változása a disszipációs ráta megváltozásának közvetlen következménye. A Kolmogorov-hosszlépték ( $\eta$ ) alakulását a vizsgált esetekben, a rácsból mért

távolság függvényében az 52. ábra szemlélteti. Mind passzív mind aktív esetben megfigyelhető, hogy nagyobb áramlási sebességekhez rendre kisebb Kolmogorov-hosszléptékek tartoznak, függetlenül a ráctól mért távolságtól, azonban nagyobb távolságok esetén kisebb különbségek tapasztalhatók az értékek között. E megfigyelés több, ebben a témában publikált eredményt is igazol: Gad-el-Hak & Corrsin (1974), Kurian & Fransson (2009) továbbá Larssen & Devenport (2002). Ezen túlmenően az azonos referenciasebességű passzív és aktív esetek összehasonlításakor látható, hogy a rács aktiválása jellemzően kisebb értékeket eredményezett csakúgy, mint ahogy arról Makita (1991) cikkében beszámolt. Továbbá bármely mérési beállítás esetén a távolsággal együtt növekvő értékek adódtak. Gad-el-Hak & Corrsin (1974) légsugaras-rács témájú publikációjukban az általam is kapott értékekkel közel megegyező eredményeket kaptak.  $x/M=30$  esetén passzív üzemi rácsnál 0,31 mm-es értéket kalkuláltak (esetemben 0,29 mm-t kaptam az  $U_{ref}=6$  m/s sebességű passzív-rács mérésénél); az aktív ráccsal végzett kísérleteikben valamivel kisebb,  $\eta=0,29$  mm-es értéket kaptak, amely esetemben 0,27 mm-re adódott.

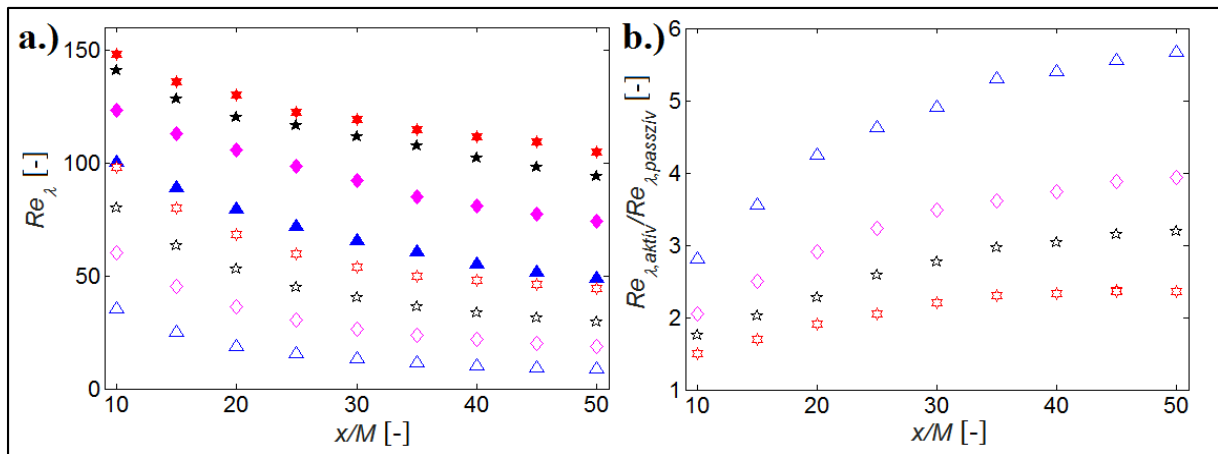


52. ábra A Kolmogorov-hosszlépték ( $\eta$ ) alakulása a mérőtér középvonalában. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. Háromszög:  $U_{ref}=3$  m/s; négyszög:  $U_{ref}=4$  m/s; pentagram:  $U_{ref}=5$  m/s; hexagram:  $U_{ref}=6$  m/s.

### Taylor-Reynolds-szám

Az eddig bemutatott mennyiségek mellett a turbulencia szintén fontos skaláris jellemzője a Taylor-Reynolds-szám ( $Re_\lambda$ ), amely ismerete főleg kisebb méretű szélcsatornákban létrehozott áramlások esetében fontos, mivel nagysága információval szolgál a turbulencia kialakulásáról. Izotrópnak feltételezett turbulencia esetén  $k$ ,  $\varepsilon$  és  $\nu$  ismeretében a korábban definiált 4.24 összefüggéssel becsülhető meg értéke. Passzív ráccsal felszerelt szélcsatornákban azok méretkorlátai miatt csupán száz-as nagyságrendű Taylor-Reynolds-számok érhetők el. Kétsíkú, polírozott alumínium rudakból készített passzív ráccsal ( $M=25,4$  mm,  $D=4,76$  mm) végzett kísérletében Mohamed & LaRue (1990)  $Re_\lambda=28,37$ -től  $Re_\lambda=41,60$ -ig változó értékeket dokumentált a ráctól  $40M$  távolságban. Comte-Bellot & Corrsin (1966) is hasonlóan alacsony,  $Re_\lambda=36$ -72 közötti értékeket regisztrált a vizsgált passzív rácsot követően. Ezekről jelentősen nagyobb értékek adódtak Kistler & Vrebalovich (1966) kísérletében, ahol is egy relatíve nagy keresztmetszetű (2,59 m $\times$ 3,51 m) szélcsatornában végeztek passzív-rács méréseket igen magas, 61 m/s-os légsebesség esetén. Ilyen beállításokkal maximálisan  $Re_\lambda=670$ -es értéket sikerült elérniük. A jelenlegi vizsgálat egyik célja szintén az

volt, hogy alacsony áramlási sebesség esetén, kisméretű szélcsatornában lehetőleg minél nagyobb értékű Taylor-Reynolds-számot lehessen elérni. A vizsgált esetekben, a csatorna középvonalában kalkulált  $Re_\lambda$  értékekről az 53. a.) ábra szolgál információval, az aktív és a passzív esetek megfelelő értékeinek arányát pedig az 53. b.) ábra szemlélteti.



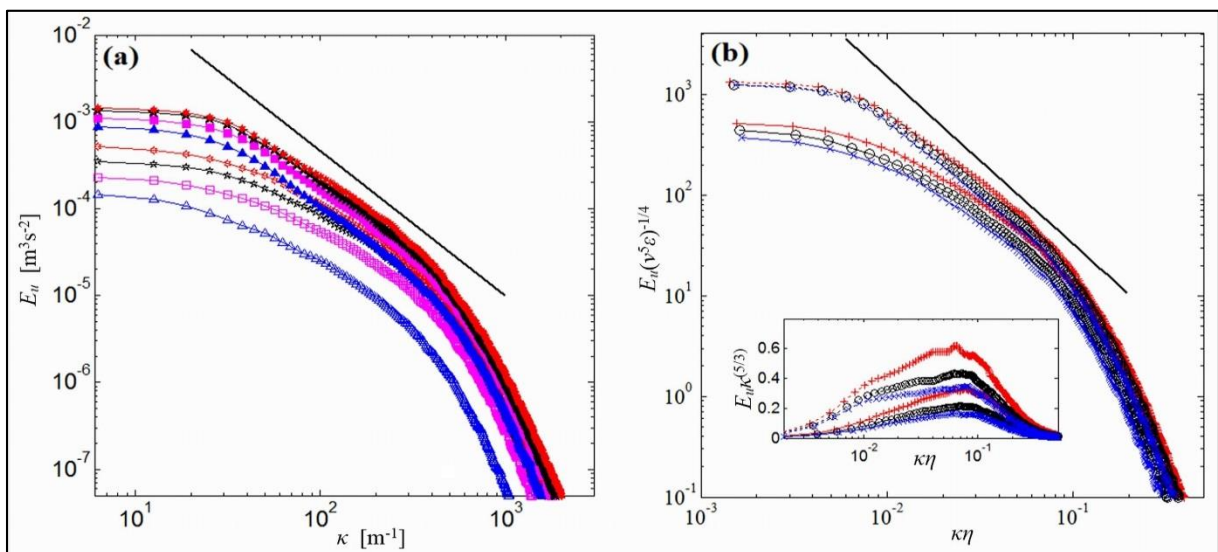
53. ábra a.) A Taylor-Reynolds-számok alakulása a szélcsatorna középvonalában. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. b.) az aktív és a passzív értékpárok aránya. Háromszög:  $U_{ref}=3$  m/s; négyzet:  $U_{ref}=4$  m/s; pentagram:  $U_{ref}=5$  m/s; hexagram:  $U_{ref}=6$  m/s.

Az 53. a.) ábra szerint, ahogy az elvárható a létrehozott, elhaló turbulencia jellemzői alapján, az  $Re_\lambda$  értékek minden esetben a távolsággal együtt csökkennek, továbbá az átlagsebességgel együtt növekednek (adott távolság mellett). Passzív esetben jellemzően alacsony értékek adódtak, amelyek oka egyrészt az alacsony áramlási sebesség, másrészt pedig a kis csatorna-keresztmetszet ( $500 \times 500$  mm). Az így kapott értékek nagyságrendileg megfelelnek az előzőekben bemutatott szakirodalmi eredményeknek. Aktív esetben közel 150-es maximális értéket sikerült elérni a rács közelében, 6 m/s-os átlagsebesség esetén, amely sebességen még  $x=50M$  távolságban is nagyobb, mint 100-as érték adódott. A rács működésének hatása számszerűleg jól összevethető Gad-el-Hak & Corrsin (1974) légsugaras rácsának kísérleti eredményeivel: esetükben 9,02 m/s-os átlagsebesség esetén passzív üzemi rácsnál  $Re_\lambda=105$ , aktív rácsnál pedig  $Re_\lambda=150$  adódott  $x/M=30$  távolságban, amely 1,43-os  $Re_\lambda$  aránynak felel meg. Ezzel megegyező távolságban, az általam vizsgált legnagyobb sebesség esetén ( $U_{ref}=6$  m/s) passzív esetben  $Re_\lambda=54$ , míg aktív rácsnál  $Re_\lambda=119$ -es értéket kalkuláltam, amely 2,2-es aránynak felel meg. Az 53. b.) ábra alapján azonban belátható, hogy nagyobb áramlási sebesség esetén kisebb értékű arány várható az aktív és a passzív esethez tartozó Taylor-Reynolds-számok között. Így a maximális Taylor-Reynolds-szám növekedés, amely meghaladta az 5,6-es értéket alacsony,  $U_{ref}=3$  m/s sebesség esetén  $x/M=50$ -nél található.

### Energiaspektrum

A turbulenciát a skaláris jellemzőkön kívül az egyes léptékeken mérhető energiájának spektrális eloszlása is jellemzi, ezért a kialakuló turbulencia jellemzéséhez ennek ismerete is szükséges. E mérések kiértékelésekor is a *MATLAB* programkörnyezetben megírt script segítségével határoztam meg a szakirodalom által jellemzően használt alapáramlás irányú egydimenziós teljesítménysűrűség-függvényeket ( $E_{ii}(\kappa)$ ). E függvények nem csupán a szemléltetés céljából hasznosak, hanem a 4. fejezetben bevezetett, majd később mind a szalag-

rács, mind pedig a légsugaras rács turbulenciájának leírásához használt több turbulencia-paraméter ( $\varepsilon$ ,  $C_\varepsilon \eta$ ,  $Re_\lambda$ ) származtatásához is nélkülözhetetlenek. Így tehát minden mérési beállítás esetén s minden mérési pontban meghatároztam ezeket a függvényeket, azonban jelen dolgozatban ezek közül csak a legszemléletesebb eseteket, variációkat mutatom be. Az 54. ábra a rácstól mért  $x/M=30$  távolságban, a csatorna középvonalában mért alapáramlás irányú sebesség-ingadozás idősorából ( $u'(t)$ ) kalkulált energiaspektrumok láthatók az összes vizsgált referenciasebességre, mind passzív, mind pedig aktív esetben. Elsőként érdemes megfigyelni azt, hogy a passzív és az aktív esetekhez tartozó görbék a sebességgel együtt a nagyobb értékek felé tolódnak el, azaz a görbék alatti területek a referenciasebességgel együtt nőnek. Ebből tehát (a 4.16 összefüggés alapján)  $U_{ref}$  sebességgel együtt növekvő turbulens kinetikus energiák adódnak, amely észrevételt az 54. a.) diagram is alátámasztja. Ettől azonban sokkal jelentősebb észrevétel is tehető: a passzív esetekben a görbéknek jellemzően egy rövidebb hullámszám-intervallumba eső szakasza közelíti meredekségében az elméleti,  $-5/3$ -os kitevőjű görbét (a diagramon e meredekséget fekete egyenes jelzi); aktív esethez tartozó görbék esetén ettől jelentősen szélesebb hullámszám-tartomány felel meg ennek. Ez Kolmogorov-elmélete alapján azt jelenti, hogy aktív rács esetén a kialakuló turbulencia spektruma szélesebb tehetetlenségi tartománnyal rendelkezik, így a passzívhoz képest kialakultabb s izotrópabb turbulenciát lehet előállítani a rács aktiválásával, amely az aktív rácsok passzívakkal szembeni egyik előnyös tulajdonsága. Ezt a tulajdonságot jellemzi kvantitatív módon a Taylor-Reynolds-szám, amely értékének nagysága szoros kapcsolatban áll a tehetetlenségi tartomány szélességével (Makita & Sekishita, 2006), így a teljesen kialakult, izotróp turbulencia feltétele a megfelelően nagy értékű  $Re_\lambda$  (a vizsgált aktív ráccsal maximálisan közel  $Re_\lambda=150$  értéket sikerült elérni). A szakirodalom alapján (Uberoi, 1963) az energiaspektrum legnagyobb energiájú hullámszáma éppen az áramlási tér jellemző méretével arányos: az 54. a.) diagramon ábrázolt legkisebb hullámszám éppen a csatorna jellemző méretéből kalkulált érték ( $\kappa_H = \pi/H = 6,28$  1/m, ahol  $H$  a csatorna mérőterének magassága), amelyhez – a szakirodalmat igazolva – a legmagasabb energia tartozik.



54. ábra a.) Alapáramlás irányú egydimenziós energiaspektrum  $x/M=30$  pozícióban. Passzív eset: üres jelölők; aktív eset: teli jelölők. Háromszög:  $U_{ref}=3$  m/s; négyszög:  $U_{ref}=4$  m/s; pentagram:  $U_{ref}=5$  m/s; hexagram:  $U_{ref}=6$  m/s. b.) Normalizált, alapáramlás irányú egydimenziós energiaspektrum  $U_{ref}=6$  m/s esetén. Jelölés:  $x/M=30$  (+), 40 (o), 50 (x). Passzív mód: folytonos vonalak; aktív mód: szaggatott vonalak. Mindkét diagramon a fekete egyenes a  $-5/3$ -os kitevőjű hatványfüggvény meredekségét szemlélteti (log-log skála).

Szakirodalmi ajánlások alapján pontosabb összehasonlítás tehető az energiaspektrum normalizálásával, dimenziótlanításával. Az irodalomban többfajta módszer is használatos. Esetemben a normalizálást Larssen & Devenport (2002), Kang et al. (2003), továbbá Larssen & Devenport (2011) szerint végeztem el: a hullámszámot ( $\kappa$ ) a Kolmogorov-hosszléptékkel ( $\eta$ ) normalizáltam, miközben az  $E_u(\kappa)$  spektrális energiát a  $(v^5\varepsilon)^{-1/4}$  összefüggéssel dimenziótlanítottam. Ennek eredménye látható az 54. b.) diagramon. E diagramon az állandó,  $U_{ref}=6$  m/s sebességhez tartozó passzív és aktív esetben kalkulált eredmények láthatók három különböző távolság esetén:  $x/M=30, 40, 50$ . Megfigyelhető, hogy a normalizálás hatására a nagyobb hullámszámok esetén összerendeződtek a görbék. Megfigyelhető továbbá, hogy mindhárom vizsgált távolság esetén az aktív esetekben jellemzően szélesebb, s a  $-5/3$ -os meredekséget jobban közelítő tehetetlenségi tartomány alakult ki. A távolsággal együtt mind passzív, mind pedig aktív esetben csökken a görbék alatti terület, habár ez a skálázás miatt aktív esetben nem olvasható le egyértelműen.

Az ebben az alfejezetben bemutatott mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a rugalmas csövecskékkel ellátott légsugaras rács mind passzív, mind pedig aktív állapotában is képes a rácesturbulenciára jellemző paraméterekkel bíró áramlást létrehozni az áramlási térben. Az aktiválás segítségével számottevő mértékben képes növelni az áramlás turbulencia-fokát, továbbá a turbulens kinetikus energiát is, amely növekedés kisebb áramlási sebességek esetén még jelentősebb. Fontos megállapítani, hogy az aktiválás nem okoz jelentős anizotrópiát, sem pedig számottevő inhomogenitást a vizsgált áramlási térben; sok, a szakirodalomban ismertett adattól az idealizált rácesturbulenciára jellemző paramétereket jobban közelítő eredmények adódtak. Ezen túlmenően a vizsgált rács lényeges tulajdonsága az is, hogy aktív állapotban – a passzívhoz viszonyítva – számottevően nagyobb Taylor-Reynolds-számok érthetők el, amelyek kialakultabb – s egyben a kisebb méretskálákon izotrópabb – turbulenciát garantálnak. Így tehát az eredeti célkitűzésnek megfelelő, viszonylag egyszerű felépítésű turbulencia-generáló rács került kifejlesztésre. Az ebben az alfejezetben bemutatott mérések és azok eredményei a Szaszák et al. 2018b folyóiratban jelentek meg.

## 8.5.A légsugar-rács keveredés-intenzifikáló hatásának vizsgálata

Az eddigiekben bemutatott – légsugaras rács tekintetében elvégzett vizsgálatok – a kifejlesztett rács működését, s az általa módosított áramlási jellemzőket voltak hivatottak feltárni. Ezek eredményei alapján bebizonyosodott, hogy a kifejlesztett rács jelentős mértékben növeli meg az áramlásnak a turbulencia erősségét leíró jellemzőit, így segítségével jelentős intenzitású, az alapáramlás sebességével áramló örvényesség hozható létre (lásd a 3.2-es alfejezetben, a turbulencia, mint jelenség definiálásánál). Ahogy azt már ismertettem, a turbulencia segítségével a molekuláris diffúziótól nagyságrendileg nagyobb intenzitású keveredés várható az áramlásban létrejövő deformációsebességek okozta nyírófeszültségek miatt. Miként azt Pope (2000) a turbulencia témájú könyvében is megfogalmazta, a keveredés számos alkalmazás esetén igen lényeges folyamat: a szennyezőanyagok légkörbe történő kibocsátásától egészen a kémiai reagenseknek égőterekben vagy reaktorokban végbemenő keveredéséig. A keveredés tehát számos ipari, kémiai folyamatnál igen fontos, ahol a reakciók hozadékai és azok szelektivitása nagyban függ a keveredés hatékonyságától. Nem megfelelő keveredés nem reprodukálható folyamatot és nem megfelelő minőségű terméket eredményezhet. Főként kis sebességű áramlásoknál jelent ez gondot, ahol a nem megfelelő keveredés inhomogenitásokhoz vezethet, amelyek a gyengén kevert fluidum-tartományok miatt

alakulnak ki. Mivel a keveredés tehát számos (ipari) folyamatban nagy jelentőséggel bír, így annak intenzifikálási lehetőségei is jelentős szerepet kaptak. Hasonlóan, mint a turbulenciageneráló rácsok esetében, e téren is megkülönböztethetünk statikus és dinamikus (aktív) keverőket.

Ghanem et al. (2014) munkájában részletesen összefoglalja a statikus mixerek különböző típusait, azonban az ilyen típusú keverők fontos jellemzője, hogy a keverendő fluidum alapáramlásának irányával párhuzamosan viszonylag hosszú szakaszon kell beépíteni ezeket a mozgó elemeket nem tartalmazó eszközöket a megfelelő keveredés érdekében. A Kenics-típusú az egyik ilyen, igen elterjedt statikus keverő, amely váltakozó perdítési irányú perdítőelemeket tartalmaz, s segítségével háromdimenziós kaotikus áramlás hozható létre (Hobbs & Muzzio, 1997). Coffey et al. (2007) – az e dolgozatban már bemutatott – fraktál-rács keveredés segítő hatását vizsgálta. Sok esetben gázok tökéletes égéséhez szükséges előállítani megfelelő turbulens paraméterekkel rendelkező áramlást. E célra az alapáramlás sebességétől függetlenül változtatható turbulencia-intenzitású keverőt vizsgáltak Marshall et al. (2011), továbbá Bedat & Cheng (1995). Azonban kísérletükben passzív elven működő keverőt alkalmaztak, amelynek a  $\sigma$  kitöltési tényezőjét változtatták.

Az aktív keverők előnye abban rejlik a passzívakhoz képest, hogy segítségükkel jelentősen lerövidíthető a keverési úthossz, így adott alkalmazásokban jelentősen kisebb helyigénnyel rendelkeznek. Továbbá az aktív keverők fontos tulajdonsága az is, hogy segítségükkel kontrollálható a létrejövő turbulencia, ezzel együtt javítható a keveredési fok (Cekli et al. 2010b; Ckiekh et al., 2012; Verbeek et al., 2013) csőben áramló közeg keverésére szolgáló aktív rácsos keverőt vizsgált, amely egy álló és egy forgó, perforált tárcsát tartalmazott.

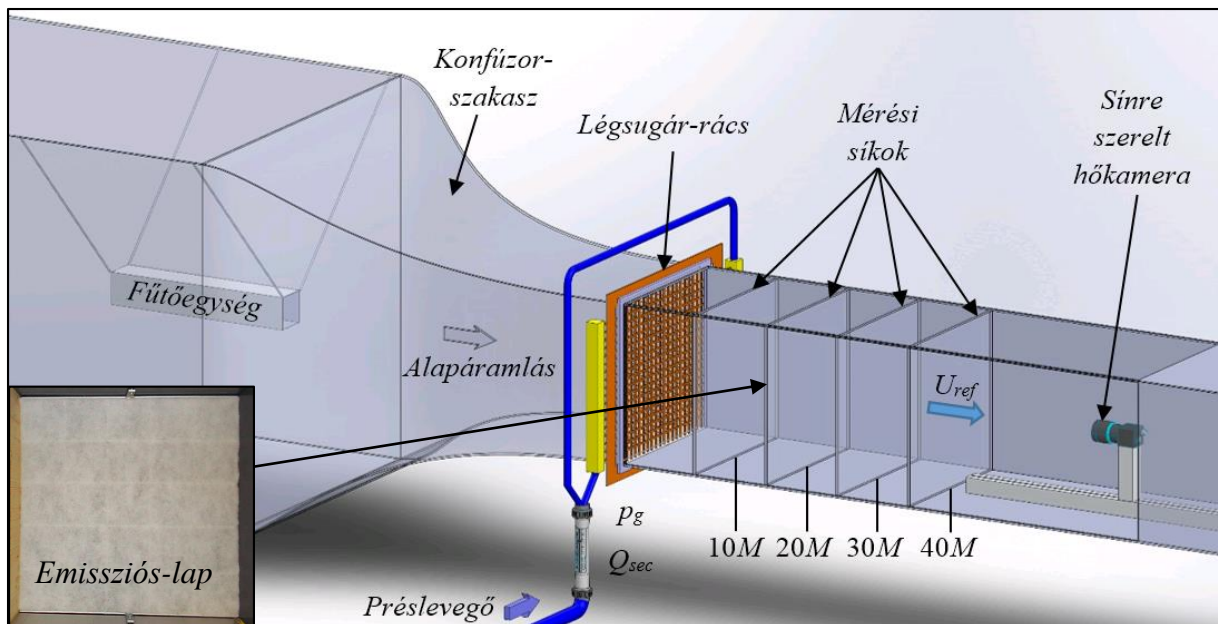
Míndezek alapján – mivel a kifejlesztett rácsokkal jelentős mértékben tudtam növelni az áramlás turbulenciáját – a laboratóriumi felhasználáson túl felmerült ezek aktív keverőként történő alkalmazása is. Ennek vizsgálata céljából egy olyan mérési módszert dolgoztam ki, amely segítségével meghatározhattam a rács homogenizáló hatását a rács különböző működési állapotaiban több átlagsebesség, továbbá több rácstól mért távolság esetén. A mérési módszer sajátosságai miatt a vizsgálatokat az 500×500 mm-es mérőtér-keresztmetszetű szélcsatornába beépített légsugaras rácson végeztem el. A rács keveredés-intenzifikáló hatásának vizsgálatát és annak eredményeit a Szaszák et al. 2018a és a Szaszák et al. 2019 publikációkban mutattuk be.

### 8.5.1. A mérési összeállítás, az alkalmazott mérési elv

A kifejlesztett légsugaras rács keveredés-intenzifikáló hatásának vizsgálatához egy olyan mérőrendszert kellett felépíteni, amely segítségével megvizsgálhattam, hogy milyen hatással van a rács aktiválása az azon keresztüláramló közeg keveredésére. Ebből a célból tehát inhomogén fizikai jellemzőkkel bíró áramlást kellett létrehoznom a rács előtti áramlási térben, majd ennek az áramlásnak kellett vizsgálnom az inhomogenitását a szélcsatorna mérőterében, miután az keresztülhaladt a rácson, amely jelen esetben a keverő szerepét töltötte be. Mivel nem állt rendelkezésemre olyan mérés-technika, amely eltérő kémiai tulajdonságú gázok eloszlását detektálta volna, ezért nem kémiailag, hanem fizikailag inhomogén áramlást hoztam létre, ahol az inhomogenitás az áramló közeg hőmérsékletében jelentkezett. A rácsot megelőző konfúzor előtti tér középvonalába építettem be egy saját készítésű, alacsony áramlási ellenállású elektromos fűtőegységet, amely segítségével az áramlási tér középvonalában magasabb hőmérsékletű légáramot tudtam létrehozni. Ez a légáram a konfúzoron átáramolva felgyorsult,



keresztmetszete lecsökkent, s ezt követően haladt keresztül a rácson. A rácst követő mérőterben attól függően, hogy milyen mértékű a keveredés, eltérő homogenitású hőmérsékletmező alakult ki a rácossal párhuzamos, de attól fix távolságban lévő mérési síkokban. Így tehát a keveredés vizsgálatát hőmérsékletmező-vizsgálatra vezettem vissza. E vizsgálataimhoz már rendelkezésemre állt a dolgozatban bemutatott hőkamera (M7 melléklet), azonban a kamerával – annak működési elve alapján – nem lehetséges gázok hőmérsékleti sugárzását detektálni. Ennek a problémának a megoldására egy olyan porózus, az áramlás által könnyen átjárható emissziós-lapot készítettem filc szűrőbetétből, amelyet a szélcsatorna mérőterében, a rácossal párhuzamosan, attól diszkrét távolságokban építettem be. Ennek az áramlási térben történő elhelyezése ugyan hatással van magára az áramlásra, hiszen a porózus közegen történő átáramlás nyomásesést hoz létre, azonban feltételezésem szerint a filclap, mint emissziós felület a különböző mérési esetek összehasonlításához megfelelően alkalmazható. A filcen átáramló levegő nyomásesésének hatására bekövetkező kihasadás megakadályozása végett a filclapot annak a rácscső felőli oldalán egy  $100 \times 100$  mm rácscső acélhálóra rögzítettem, amelyen egyúttal egy merev keretet is kialakítottam. Ezen a kereten csavarmentes rögzítőelemeket helyeztem el, amelyekkel az emissziós lapot a mérési esetnek megfelelő pozícióban tudtam rögzíteni. A hőkamerát az áramlási térben az emissziós-laptól megfelelő távolságban elhelyezve már mérhetővé vált a felület hőmérséklet-eloszlása, amely a lapnak választott filcanyag alacsony hőtehetetlenségének okán igen gyorsan képes volt lekövetni az áramló közeg hőmérsékletváltozásait. A mérési összeállítást az 55. ábra szemlélteti.



55. ábra A hőkamerás mérésekhez összeállított mérőrendszer vázlatja.

Az ilyen módon készített felvételeket kielemezve meghatározhattam az áramlási tér egy-egy keresztmetszetében a hőmérsékletmezőt, amely adataiból pedig következtethettem az adott távolságbeli keveredétség mértékére.

Ahogy az a mérőrendszer vázlatán is megfigyelhető, a rácstól mért négy különböző, a rácossal párhuzamos síkban végeztem méréseket:  $x/M=10; 20; 30; 40$ . Egy-egy adott távolság beállítása esetén az emissziós lapot rögzítettem, majd a csatorna középvonalába pozicionált,

sínen csúsztható hőkamerát tőle megfelelő – minden  $x/M$  beállítás esetén azonos – távolságban rögzítettem. Ilyen módon biztosítottam, hogy a mérés helyétől függetlenül azonos térbeli felbontású hőmérsékletmező-képeket rögzíthessek, amelyeket később a *MATLAB* alkalmazásban erre a célra készített programommal dolgoztam fel.

Mivel a légsugaras rács által létrehozott turbulencia vizsgálatai rámutattak arra, hogy kisebb sebességek esetén jelentősebb mértékű a turbulencia erősödése (lásd 47. és 49. ábrák), ezért a keveredést is kisebb referenciasebességeken vizsgáltam, amelyek értékei a következők voltak:  $U_{ref}=1,5$  m/s; 2 m/s; 2,5 m/s; 3 m/s.

A rács homogenizáló hatását annak három különböző üzemállapotában vizsgáltam attól függően, hogy a rácsához vezetett préslevegő mekkora mértékű túlnyomással rendelkezett az Y-elágazásnál kialakított mérőpontban:

- a.)  $p_g=0$  hPa, amely esetben nem volt préslevegő-hozzávezetés, a rács passzív módban üzemelt nyugalomban lévő aktív elemekkel.
- b.)  $p_g=250$  hPa, amely esetben a rács hagyományos légsugaras rácsként üzemelt: az aktív elemei a síkjára közel merőlegesen, de mozdulatlanul helyezkedtek el, továbbá belőlük nagysebességű légsugarak lövelltek az alapáramlással ellentétes irányba.
- c.)  $p_g=500$  hPa, a rács turbulencia-vizsgálatánál is alkalmazott túlnyomás (aktív rács-állapot), amely esetén az aktív elemek kaotikus mozgást végeztek, miközben belőlük folyamatosan változó irányú légsugár lövellt ki.

A levegő melegítéséhez villamosság- és hőtani számításaim alapján egy olyan légfűtőegységet terveztem meg majd állítottam össze, amely segítségével változtatható fűtőteljesítménnyel tudtam melegíteni a rajta átáramló levegőt. Emellett fontos szempont volt az eszköz lehetőleg minimális légellenállása, hogy a sebességmezőben minél kisebb anomáliákat, s ezzel együtt minél kisebb zavarást okozzon. Ehhez egy négyzet keresztmetszetű (100×100 mm), 600 mm hosszúságú alumíniumlemez-csatornát állítottam össze, amelynek belsejébe előzetes kalkulációim alapján a szükséges hőteljesítményhez megfelelő hosszúságú ellenálláshuzalt építettem be olyan módon, hogy az közelítőleg a teljes keresztmetszeten átáramló levegőt melegíthesse. Ezt az egységet a szélcsatorna konfúzor szakasza előtt, annak középvonalában huzalokkal pozicionáltam, továbbá az adott áramlási sebességhez megfelelő villamos teljesítményt egy csatornán kívül elhelyezett *MPower-8A* típusú toroid transzformátorral állítottam be. Ahhoz, hogy közelítőleg azonos hőmérsékletű levegő hagyassa el a fűtőegységet, annak villamos teljesítményét (amely jó közelítéssel megegyezett a légáramlás által elszállított hőteljesítménnyel) az  $U_{ref}$  sebességgel arányosan változtattam, így  $P_{vill}=150$  W, 200 W, 250 W, 300 W értékeket állítottam be az adott referenciasebességnek megfelelően. A villamos teljesítményt a toroid transzformátor kimeneti ágán egy *Voltcraft Energy Logger 3500* típusú digitális mérőeszköz segítségével állítottam be (**M18** melléklet). A b.) és a c.) mérési esetben bejuttatott másodlagos levegő mennyiségével – konstans  $U_{ref}$  mellett – ugyan némileg csökkent a primer légáram mennyisége, azonban ennek a mérésre gyakorolt esetleges hatásait nem vettem figyelembe. Az egyes vizsgált esetek eredményeinek összevetése kapcsán felmerült, hogy olyan kontrollmérést is végezzek, amely esetén nem hozok létre inhomogén hőmérsékletmezőt, azaz nem üzemeltetem a fűtőegységet, így az eredményeket összehasonlíthatom a homogénnek feltételezett hőmérsékletmező eredményeivel. Ilyen módon a ráctól  $x/M=20$  távolságban,  $U_{ref}=3$  m/s sebesség esetén, a rács aktív üzemállapotában fűtés nélkül is (a fenti c. beállításban) készítettem hőtérképeket.

Az előbbieken bemutatott paraméterek alapján összesen  $4 \times 4 \times 3 + 1$ , azaz 49 mérési esetben volt szükséges a hőkamerával hőtérképeket készíteni. Egy-egy mérési esetben 10 hőtérképet

készítettem a kamera maximális, 640×480 pixeles felbontásán, így a későbbiekben az adatfeldolgozásnál ezek eredményeit átlagoltam majd értékeltem ki. A hőtérképek esetén az egyes pixelek helyén maguk a hőmérséklet-értékek voltak eltárolva (Celsius-skálán, két tizedes értékkel), így tehát kétdimenziós mátrixokat, mint bemenő adatokat dolgozhattam fel a *MATLAB* programban erre a célra általam készített script segítségével.

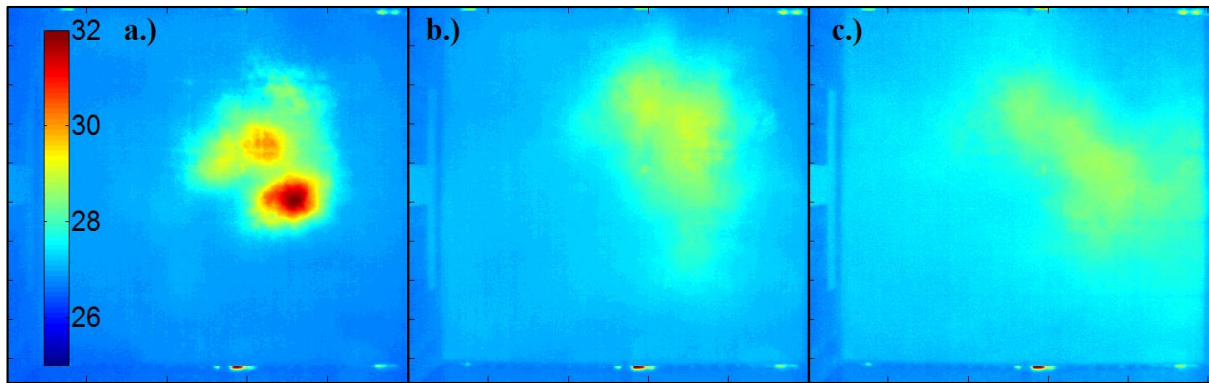
A program az adatbeolvasást követően mérési esetenként 10×640×480 méretű mátrixokba rendezte a hőmérsékletértékeket. Mivel a kamera által készített „nyers” hőtérképek az emissziós felület értékein túl a szélcsatorna oldalfala egy részének irreleváns hőmérsékleti értékeit is tartalmazták (az 56. ábrán a hőtérképek széleinél megfigyelhető hőmérséklet-anomáliák), ezért elsőként levágtam a nem kívánt részeket, így eredményül 10×420×430 méretű hőmérséklet-mátrixokat kaptam, s a későbbi feldolgozáshoz ezek adatait használtam fel. Ezen értékek minden mérési esetben a vizsgált felület fizikailag azonos pontjainak feleltek meg, mivel a sínrendszer segítségével a kamera és az emissziós felület relatív pozíciója s irányultsága nem változott a vizsgálatok alatt. Minden hőtérkép esetén azonos statisztikai paramétereket határoztam meg: átlag, szórás, medián, módusz, torzultság, továbbá az adathalmazból hisztogramokat is készítettem. A hisztogramok összehasonlíthatósága végett azokat normalizálni kellett, ehhez pedig az egy-egy hőtérképen szereplő leggyakoribb hőmérsékletértéket ( $T_{md,m}$ ), azaz a móduszt alkalmaztam:

$$T_{norm(m,n,o)} = \frac{T_{m,n,o}}{T_{md,m}}, \quad (8.21)$$

ahol  $T_{norm(m,n,o)}$  az  $m$ -edik hőtérkép  $n$ -edik sorának  $o$ -edik elemének normalizált értéke,  $T_{m,n,o}$  ugyanezen elem még nem normalizált hőmérsékletértéke, továbbá  $T_{md,m}$  pedig az  $m$ -edik hőtérkép figyelembe vett elemeinek módusza. Így tehát a pontbeli normalizált hőmérsékletértékek alapján készítettem el a hisztogramokat, amelyeken – a normalizálásnak köszönhetően – minden görbe az egységnyi értéknél érte el a maximumát (mivel az egység felelt meg a leggyakoribb hőmérséklet-értéknek). Ezt követően az egy-egy mérési esethez tartozó hőtérképek statisztikai paramétereinek értékeiből kiszámítottam azok átlagát és szórását is, amely értékeket Excel-táblázatba exportáltam, hogy ezek ismeretében a keveredést kvantitatív módon jellemezhessem.

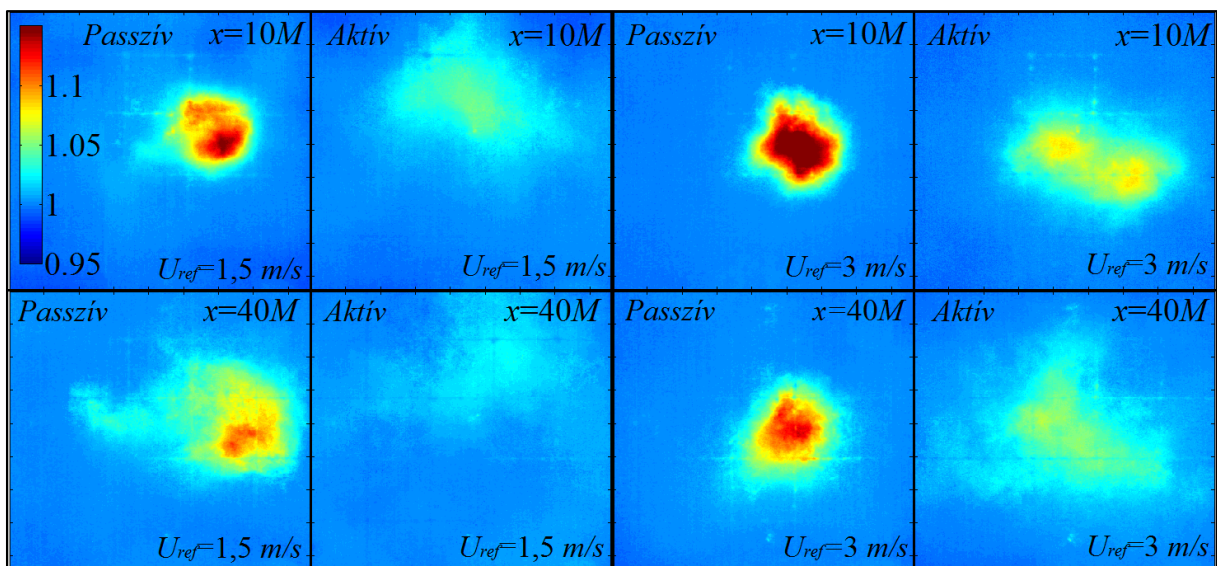
### 8.5.2. A keveredéssel kapcsolatos paraméterek bemutatása

Az adatfeldolgozást megelőzően is jól szemléltetik a rács keveredés-javító hatását maguk, az emissziós felületről készült hőtérképek is. A referenciasebességet állandó,  $U_{ref}=1,5$  m/s értéken tartva, a rácstól mérve állandó,  $x=10M$  távolságban rögzített emissziós felület hőmérsékletértékeit szemléltetik az 56. ábrán látható hőtérképek. A három hőtérkép (a., b. és c.) rendre a rács három működési állapotát (passzív, fél-aktív, aktív) mutatja. Fontos megjegyezni, hogy az ábrán látható hőtérképek még a csatorna faláról visszavert hőmérsékleti értékeket is mutatják; ezeket a részeket az adatfeldolgozás során nem vettem figyelembe. Megállapítható, hogy állandó értékű légsebességen már a legkisebb vizsgált,  $10M$  távolság esetén is a rács aktiválása jelentős mértékben növelte a keveredést: a passzív eset (a.) jellemzően inhomogén hőmérséklet-mezejéhez képest homogénebb hőmérséklet-eloszlás látható az ábra b.) részén az ellenirányú légsugarak alkalmazásakor, s ettől is homogénebb mezőt eredményezett a c.), mozgó aktív elemekkel megvalósított üzemi állapot.



56. ábra Hőterképek a rácstól mért  $x=10M$  távolságban,  $U_{ref}=1,5$  m/s esetén a három vizsgált rác-állapotban, azonos hőmérsékleti skálázással ( $^{\circ}C$ ). a.)  $p_g=0$  hPa (passzív eset); b.)  $p_g=250$  hPa (fél-aktív eset); c.)  $p_g=500$  hPa (aktív eset).

Egy másfajta összehasonlítást tesz lehetővé az 57. ábra, ahol egy-egy mérési beállítás esetén a legközelebbi ( $x=10M$ ) és a legtávolabbi ( $x=40M$ ) vizsgált keresztmetszetekben kialakuló sebességmezőket hasonlíthatjuk össze. A minél szignifikánsabb különbségek bemutatása érdekében a szemléltetéshez a legkisebb ( $U_{ref}=1,5$  m/s) és a legnagyobb ( $U_{ref}=3$  m/s) sebességeken, továbbá a passzív (a.) és aktív (c.) állapotban üzemelő rác esetén készített hőterképeket ábrázoltam. Ebben az esetben a későbbi adatfeldolgozáshoz is felhasznált hőképeket szemléltetem (a hőterképek egyéb részeit levágtam). Az összehasonlíthatóság végett az adott hőterkép móduszával normalizáltam annak hőfok-értékeit, így az ábra skálázása ennek megfelelően lett feltüntetve. Az 57. ábra hőterképeinek egyik tanúsága a rácstól mért távolság szerepének hatása: mindegyik mérési esetben megfigyelhető, hogy a nagyobb távolsághoz rendre kisebb maximumok tartoznak, továbbá az egységnyitől nagyobb értékek is szélesebb tartományt fednek le. Ezek alapján megállapítható, hogy mind passzív, mind pedig aktív esetben a távolsággal együtt homogénebb hőmérsékletmező alakul ki az áramlásban.

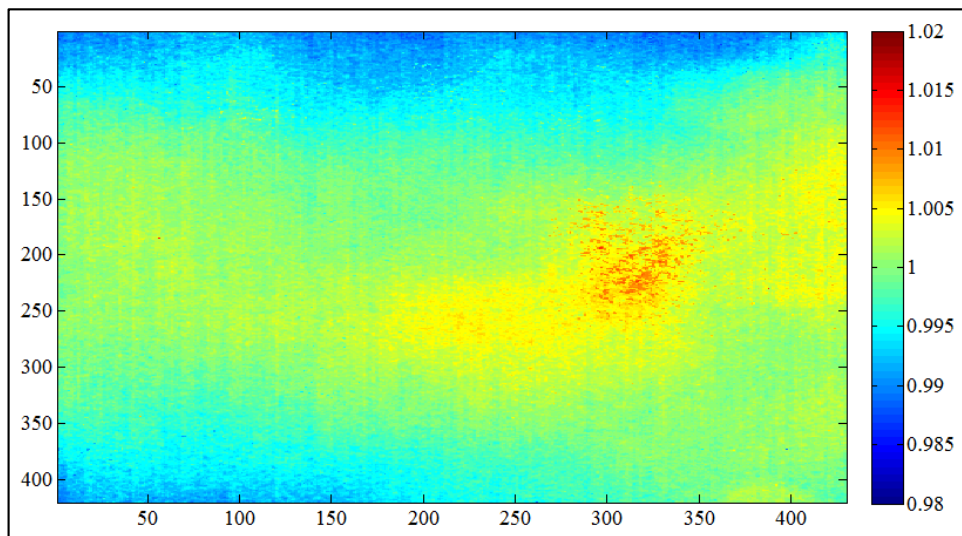


57. ábra A módusszal normalizált hőterképek ( $T_{norm}$ ) a rácshoz legközelebbi ( $x=10M$ ) és legtávolabbi ( $x=40M$ ) mérési síkokban  $U_{ref}=1,5$  m/s és  $U_{ref}=3$  m/s sebességek esetén, a rác passzív (a.) és aktív (c.) állapotaiban.

Ezen túlmenően megfigyelhető mind passzív, mind pedig aktív esetben az áramlási sebesség keveredésre gyakorolt hatása is. Mindegyik összetartozó képpár esetén a magasabb,

$U_{ref}=3$  m/s sebességhez tartozó esetekben nagyobb inhomogenitás figyelhető meg, mint a kisebb sebességek esetén. Ebből tehát arra lehet következtetni, hogy az áramlási sebességnek szintén jelentős hatása van a homogenizációra. Mivel a vizsgált sebességtartományban jellemzően turbulens az áramlás ( $Re_H \approx 48\ 000 \div 96\ 000$ ), ezért a tapasztalt különbségek valószínűsíthetően abból adódnak, hogy kisebb áramlási sebesség esetén az áramló közeg hosszabb idő alatt jut el a vizsgált keresztmetszetig, így az alapáramlással együtt sodródó örvények jelentősebb mértékű keveredést tudnak okozni. A hőterképeken megfigyelhető továbbá az is, hogy a kisebb keveredettségre tartozó meleg légcsovák kissé a hőkép jobb felső sarka felé térnek el annak közepétől. Ennek oka az lehet, hogy a szélcsatorna csillapítókamrájába behelyezett légmelegítő egység valószínűleg a szélcsatorna középtengelyével nem tökéletesen párhuzamosan került beépítésre; azonban feltételezhetően ez a kismértékű eltérés nem befolyásolta a kiértékelést.

A kontrollmérés esetén készített egyik normalizált hőterkép látható az 58. ábrán. Az előbbi ábrához képest különbség, hogy a hőmérséklet-anomáliák szemléltetése végett itt jóval kisebb,  $\pm 2\%$ -os színskála-intervallumot alkalmaztam.



58. ábra A kontrollmérés egyik normalizált hőterképe.

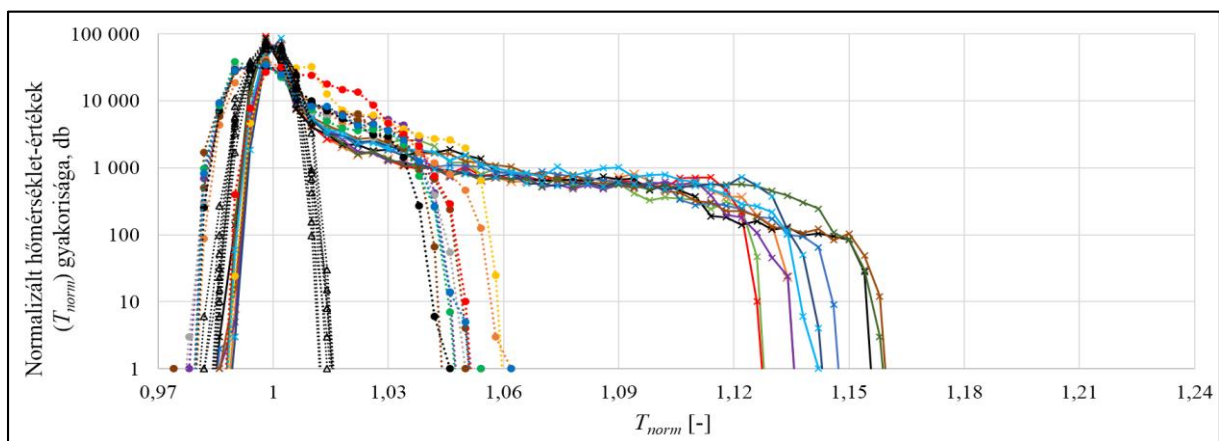
Az összes, kontrollméréshez készített hőterkép esetén kevesebb, mint  $3,2\%$ -os eltérés adódott a legmagasabb és a legalacsonyabb normalizált hőfok-érték között. Így megállapítható, hogy az aktív üzemi állapotban esetlegesen bevitt, az alapáramlástól magasabb hőmérsékletű légsugarak önmagukban nem okoztak jelentős inhomogenitást a vizsgált esetben.

Az előzőekben bemutatott ábrák bár szemléletesen használhatók a hőmérsékletmezők inhomogenitásának vizualizálására, mégis csupán kvalitatív módon minősítik azt. Ezért a későbbiekben egyéb módszerekkel kívántam jellemezni a keveredési-fokot, amelyhez a *MATLAB* programban kalkulált mennyiségeket használtam fel.

Elsőként a hőterképek értékei alapján készített hisztogramokat ismertetem, mivel ezek alakja szoros összefüggésben áll a tömésérték-eloszlással. Ahogy azt az előzőekben részleteztem, az egyes hisztogramok összehasonlíthatósága végett minden esetben az adott hőkép móduszával normalizáltam a hőmérséklet-értékeket. Az összes mérési eset közül kiválasztottam a leginhomogénebbet ( $x=10M$ ,  $U_{ref}=3$  m/s, passzív eset), s annak normalizált hőmérséklet-intervalluma alapján  $[0,8 \div 1,4]$ -es értékhatárok közötti tartományt használtam fel

a hisztogramokhoz; így azok minden mérési esetben lefedték a kapott eredményeket. A hisztogram az eloszlás-függvényhez hasonló jellegű görbét ad, azonban a vízszintes tengelyén nem diszkrét értékek, hanem adott szélességű tartományok (bin-ek) találhatóak. A vizsgált adatsor elemeit tehát a megfelelő részintervallumokba rendezem, s eredményül az adott tartományba eső értékek darabszámát adja meg. Az általam kalkulált hisztogramok esetén a  $[0,8 \div 1,4]$  relatív-hőmérséklet tartományt összesen 150 részintervallumra (bin-re) bontottam fel, így minden normalizált hőkép esetén megkaptam a hisztogram 150 adatpárját. Mérési beállításonként az adott esethez tartozó hőképek eredményeit átlagoltam, így a kiértékeléshez mérési esetenként egy-egy hisztogram-függvényt kaptam. Amennyiben a hőmérsékletmező teljesen homogén, azaz csupán egyetlen hőmérsékletértéket tartalmaz, abban az esetben a hisztogram tú alakú, s a tú hossza megegyezik az összes hőmérsékletérték darabszámával. Inhomogénebb mező esetén az értékek szélesebb értéktartományban vannak jelen, így a hisztogram egy-egy résztartományának megfelelő értékek darabszáma széteszik a részintervallumok között, tehát a hisztogram alakja egy szélesebb tartományt lefedő görbe, amely görbe maximuma minden esetben az 1-es értéknél jelentkezik, hiszen a módusszal történt normalizálás éppen ezt a célt szolgálja. Ezek alapján tehát minél szűkebb a görbék által lefedett tartomány, annál homogénebb a hőmérsékletmező.

Annak eldöntésére, hogy az egyes hőterképek alapján kalkulált hisztogramok átlagolása megfelelően alkalmazható-e, meg kellett vizsgálnom, hogy egy-egy adott mérési beállításhoz tartozó hisztogramok jellegükben szignifikánsan elkülönülnek-e egymástól. Ezért az  $x/M=20$  távolságban,  $U_{ref}=2$  m/s esetén, passzív (a.) és aktív (c.) mérési esetben készített 10-10 hőterkép eredményeit ábrázoltam (59. ábra), amelyek mellett a kontrollméréshez tartozó hisztogramokat is szemléltettem. A jobb szemléltethetőség végett a függőleges tengelyen logaritmikus léptéket alkalmaztam.

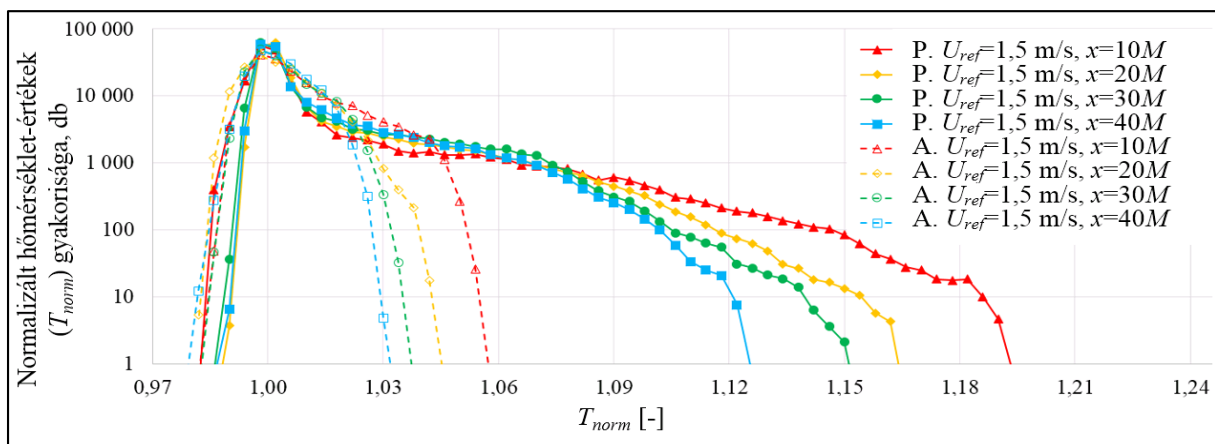


59. ábra Az  $x/M=20$  távolságban,  $U_{ref}=2$  m/s esetén, passzív és aktív esetben készített 10-10 hőterkép, továbbá  $U_{ref}=3$  m/s sebességű, aktív esetben fűtés nélkül készített kontroll-mérések hisztogramjai.  
Jelmagyarázat: passzív esetek: -x-; aktív esetek: --●--, kontroll-mérés: ...△...

A diagram alapján megfigyelhető, hogy a három bemutatott eset (passzív, aktív, kontroll) jelentősen elkülönül egymástól. Amennyiben az azonos távolságban vizsgált passzív és aktív esetet vetjük össze látható, hogy az egyes hőterképek alapján készült hisztogramok hasonlóak, s a szórásuk jóval kisebb a passzív és az aktív eset közötti eltéréstől. Ezek alapján tehát az egy-egy mérési esethez tartozó hőterképek eredményeinek átlagolása alkalmazható a kiértékelés során. Mindezekon túl megfigyelhető az is, hogy a kontrollmérés hisztogramjai egymáshoz igen

közel futnak, s – miként azt a hőtérképnél is megjegyeztem – a normalizált hőmérsékletértékek ( $T_{norm}$ ) igen szűk tartományban mozognak. E diagram elsődleges célja az egyes mérési esetekhez tartozó hisztogramok kiátlagolhatóságának eldöntése volt, ezért további, a hisztogramok alapján tehető megállapításaimat a későbbiekben fogom megtenni.

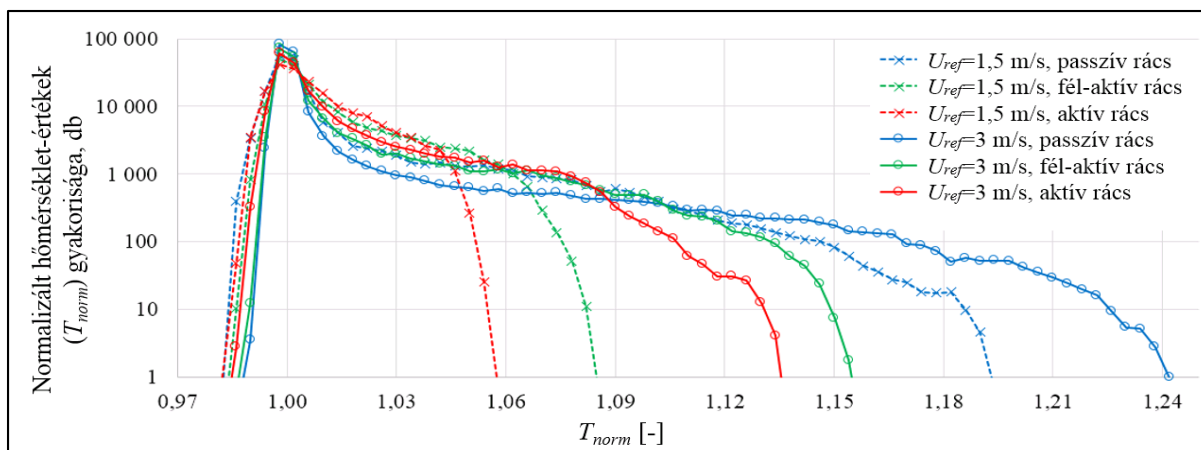
A 60. ábrán a legkisebb,  $U_{ref}=1,5$  m/s átlagsebesség esetén vizsgált passzív- (a.) és aktív rács (c.) állapotokhoz tartozó normalizált hőmérséklet-értékek átlagolt hisztogramjait ábrázoltam mind a négy megfigyelt pozíció esetén. Miként az az ábrán is látható, passzív esetben lényegesen nagyobb mennyiségű egységnyihez közeli értéket tartalmaz egy-egy hőkép, mint attól eltérő értéket, ezért a jobb szemléltetés végett itt is logaritmikus léptékben ábrázoltam a függőleges tengelyt.



60. ábra A módusszal normalizált hőmérsékletmezők hisztogramjai passzív (P) és aktív (A) esetekben  $U_{ref}=1,5$  m/s átlagsebesség esetén, a ráctól mért  $x=10M-20M-30M-40M$  távolságokban lin-log skálázással. Jelmagyarázat: a diagramon feltüntetve.

Az ábra alapján több, a hőmérséklet-eloszlást jellemző megállapítás is tehető. Mind passzív (folytonos görbék), mind pedig aktív esetben (szaggatott görbék) a távolsággal együtt monoton csökkenő szélességű tartományt fednek le a görbék. Ebből tehát ismét arra lehet következtetni, hogy a távolsággal együtt mind passzív, mind pedig aktív esetben nő a hőmérsékletmező homogenitása, tehát a ráctól mért távolság, mint paraméter – függetlenül a rács üzemmódjától – fontos szerepet játszik a keveredésben. Amennyiben az azonos távolsághoz, de különböző rács-üzemmódhoz tartozó görbéket vizsgáljuk, akkor megállapíthatjuk, hogy e mérési beállítások esetén az aktív állapot mindenkor jelentősen szűkebb intervallumot eredményezett, amely az egységnyi érték környezetére szűkült. Ebből adódóan igazolható a rács aktiválásának keveredés-intenzifikáló hatása, hiszen a távolságtól függetlenül kisebb mértékű hőmérséklet-eltéréseket eredményezett az aktiválás.

Egy másféle összehasonlítást tesz lehetővé a 61. ábra, amely szintén normalizált hőmérséklet-hisztogramokat jelenít meg. Ebben az elrendezésben a rácshoz legközelebbi,  $x=10M$  távolságban,  $U_{ref}=1,5$  m/s és  $U_{ref}=3$  m/s referenciasebességeken vizsgált sík eredményei láthatók a rács mindhárom üzemmódja (a., b. és c.) esetén. Megállapítható, hogy mindkét rögzített sebesség esetén rendre csökkenő szélességű tartományt lefedő körbékét eredményeztek a passzív, fél-aktív és aktív rácsállapotok, így tehát az aktiválás homogenizáló hatása a vizsgált sebességtartományban, még a rácshoz legközelebbi távolságban is egyértelműen kimutatható. Továbbá megfigyelhető, hogy a fél-aktív rács eredményei a passzív és az aktív állapotokban kapott görbék közé esnek, amely eredmény az 60. ábra megfigyeléseit igazolja.

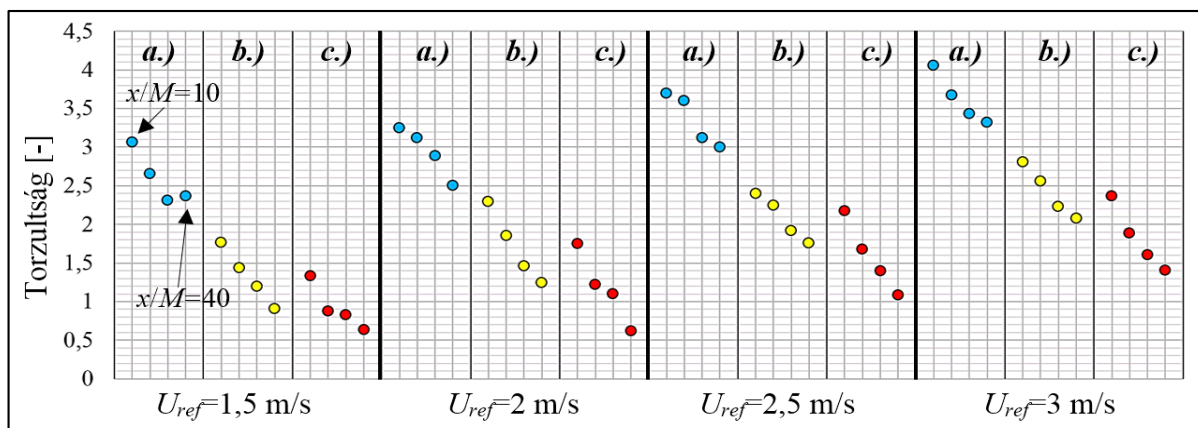


61. ábra A módusszal normalizált hőmérsékletmezők hisztogramjai passzív, fél-aktív és aktív esetekben  $U_{ref}=1,5$  m/s és  $U_{ref}=3$  m/s átlagsebességek esetén, a ráctól mért  $x=10M$  távolságokban lin-log skálázással. *Jelmagyarázat: a diagramon feltüntetve.*

Emellett azonban az is látható, hogy a rács aktív üzemi állapotában, ebben a távolságban messze nem érhető el azonos homogenitás a két sebesség esetén: 3 m/s esetén jelentősen szélesebb intervallumot fed le a görbe, így nagyobb a hőmérsékletmező értékeinek tartománya is. Mindezek alapján tehát levonhatjuk a következtetést, miszerint a teljesebb keveredés, tehát a homogénebb hőmérsékletmező elérése érdekében a rács aktív állapota mellett egyrészt az áramlási átlagsebesség csökkentése, másrészt pedig a keveredési úthossz növelése szükséges.

A hisztogramokon túl más, statisztikai paramétereket is meghatároztam, amelyekkel szintén a keveredés mértékét kívántam minősíteni. Az egyes statisztikai mennyiségek vizsgálatakor úgy találtam, hogy bár az adatok szórása szoros összefüggésben áll a mérések alatt változtatott paraméterekkel (átlagsebesség, távolság, rács-aktivitás), azonban a keveredési-fokra legjellemzőbb mennyiség a torzultság. A statisztikában használatos torzultság (skewness) az adatsor valószínűség-eloszlásának az aszimmetriáját kifejező mennyiség. Amennyiben normál-eloszlású az adathalmaz (az átlag megegyezik a mediánnal és a módusszal), úgy a torzultság zéró értékű. Olyan esetekben, amikor a normál eloszláshoz képest valamelyik irányban torzult az eloszlás, a torzultság értéke pozitív vagy negatív is lehet. Azoknál az eloszlásoknál, amikor a módusztól nagyobb értékű az átlag, pozitív torzultságról beszélünk, s – a kontrollmérés kivételével – az általam vizsgált összes mérési esetben is ilyen reláció állt fenn a két mennyiség között. A kontrollmérés esetén, tehát aktív esetben, de a fűtőegység üzemeltetése nélkül jó közelítéssel homogén hőmérsékletmezőket kaptam (lásd 58. ábra), amelyek hisztogramjai (59. ábra) is szimmetrikusnak adódtak. Azonban az átlagos torzultság értéke  $-0,16$ -ra adódott. Ez matematikailag azt jelenti, hogy a vizsgált adathalmaz átlagértéke a leggyakoribb értéktől kisebb: esetemben a különbség  $0,02$  °C-ra adódott, amely mérési bizonytalanságnak is betudható. A kontrollmérés kivételével az összes mérési esetben pozitív torzultság-értékek adódtak, amely jelenség egyébként a bemutatott hisztogramokon is megfigyelhető. A módusztól (1-es érték a hisztogram abszcisszáján) balra található görbeszakaszok minden mérési esetben meredeken, igen közel futnak egymáshoz, azonban a módusztól jobbra található görbeszakaszok jelentősen eltérnek egymástól, továbbá jóval szélesebb értéktartományt fednek le, amely alapján a módusztól nagyobb értékű átlag várható. A passzív, fél-aktív és aktív mérési esetekben, továbbá mérési beállításonként az összes mért síkban kapott torzultság-értékeket ábrázolja a 62. ábra.





62. ábra Torzultság-értékek az összes vizsgált mérési esetben és síkban. Jelmagyarázat: kék körök: passzív üzemállapotú rács, sárga körök: fél-aktív rács, piros körök: aktív üzemállapotú rács, továbbá az azonos színű csoportok elemei a ráctól mért távolság függvényében ábrázolva.

Az ábra alapján egyértelműen megállapítható, hogy az eloszlás torzultságát jellemző mennyiség szoros kapcsolatban áll a vizsgálatok során módosított paraméterekkel. Talán a legerősebb kapcsolat a torzultság-értékek és a ráctól mért távolságok között figyelhető meg: egyetlen kivétellel minden vizsgálati esetben monoton csökkenő értékek adódtak a távolság függvényében, amely az eddigi megállapításokat is megerősíti, amennyiben a homogénebb eloszlást a kisebb értékű torzultságnak feleltetjük meg. Emellett a rács aktivitása is erősen befolyásolja a torzultság értékét, hiszen bármely vizsgált sebesség esetén az aktívabb rács rendre kisebb értékeket eredményezett adott, ráctól mért távolságokban. Továbbá az áramlás átlagsebességének hatása is egyértelműen megfigyelhető a diagramon: az áramlási sebesség növekedésével mindhárom rács-állapot esetén nagyobb torzultság-értékek adódtak, tehát a hőmérsékletmező inhomogénebb, amiből a kisebb keverési fokra lehet következtetni. Annak eldöntése céljából, hogy az elkeveredés mértékét bizonyosan megfeleltethetem-e az eloszlás torzultsági jelzőszámának, kontrollmérést végeztem. Ekkor nem működtettem a légmelegítő egységet. E vizsgálatot  $U_{ref}=3$  m/s referenciasebességen és aktív üzemű rács esetén végeztem el az  $x=20M$  mérési síkban. Eredményül  $-0,16$ -os torzultság-értéket kaptam, amely a fűtött állapotokhoz képest (pl. fűtés esetén, ugyanezen mérési beállításoknál  $1,9$  adódott) jelentősen közelebb áll a zéró értékhez, amely statisztikailag a normál-eloszlásnak felel meg. Mindezek alapján tehát egy olyan statisztikai mérőszámot találtam, amely segítségével kvantitatív módon lehet kapcsolatot teremteni az egyes mérési állapotok és a keveredettségek mértéke között.

Az előzőekben bemutatott eredmények alapján különböző hőmérsékletű gázok segítségével lehetőségem adódott a kifejlesztett, új típusú légsugaras rács turbulens keveredésre gyakorolt hatását vizsgálnom hőkamerás mérés technika alkalmazásával. A hőtérképek adatai alapján több szempontból mind kvalitatív, mind pedig kvantitatív módon sikerült karakterizálni a hőmérsékletmezőt, s ez alapján magát, a keveredést is. Ezen eredmények alapján megállapítható, hogy relatíve kis áramlási sebességek esetén is jelentős mértékben csökkenti a keveredéshez szükséges úthosszt az aktív állapotú rács, amely sok lehetséges alkalmazás esetén hasznos tulajdonsága lehet. Ezen túlmenően sikerült egy olyan statisztikai mennyiséget találnom (torzultság), amely mennyiség alakulása szoros összefüggésben áll a hőmérsékletmező inhomogenitásával, azaz ebből adódóan az áramlás keveredtségével.

## 9. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen értekezés témája új típusú, turbulencia generálására alkalmas aktív rácsok kifejlesztése és azok laboratóriumi vizsgálata. A dolgozat első részében bemutattam a doktori témám alapjául szolgáló, Németországban végzett kutatómunkám legfontosabb eredményeit, amelyek alapján arra az elhatározásra jutottam, hogy a diplomám megszerzése után doktori kutatómunka keretein belül folytatom az aktív rácsokkal kapcsolatos tudományos tevékenységeimet.

A saját kutatásommal kapcsolatos munkám leírása előtt, annak bevezetéseként részletes szakirodalmi összefoglalót készítettem, amely bemutatja többek között a turbulenciát, mint jelenséget, továbbá annak generálásához alkalmazható különböző típusú rácsokat, a létrejött turbulens áramlás minőségét jellemző fizikai mennyiségeket.

Kutatómunkám első részében a szükséges vizsgálatokhoz egy kisméretű szélcsatornát terveztem meg. Az összeállított szélcsatornában végzett vizsgálatok segítségével optimalizáltam a csatornába beépített áramlásrendező elemek elhelyezését annak érdekében, hogy minél homogénebb sebességmező alakulhasson ki annak mérőterében, amely a turbulenciagenerátorok vizsgálatának egyik feltétele.

Saját ötletem alapján egy olyan, külön energiaforrást nem igénylő rácsot terveztem meg majd építettem be az előzőleg általam tervezett majd összeállított szélcsatornába, amely aktiválását maga az alapáramlás idézi elő. Megfelelő sebesség esetén a rácselemeket alkotó rugalmas szalagok periodikus torziós mozgást végeztek, így a mozgó szalagok egyrészt folyamatosan változtatják a rácsra jellemző kitöltési tényező értékét, továbbá a mozgó elemek jelentős mértékű örvényképződést okoznak. Az első prototípus esetén műanyag szalagokat alkalmaztam aktív elemekként, azonban azok rövid működési élettartama miatt más megoldást kerestem. A rács továbbfejlesztéseként a műanyag szalagok helyét acélszalagokat alkalmaztam. Ezek feszítéséhez megfelelően merev tartószerkezetet is készítettem, amelyen csavarrugós feszítőegység szolgál a szalagok egyenként történő megfeszítésére. A feszítőerő adott értékre történő beállításához szalagonként erőmérő egységgel láttam el a turbulenciagenerátort.

A szalag-rács által létrehozott turbulenciát a rács utáni mérőterben, állandó hőmérsékletű légsebességmérő technikával vizsgáltam. A szisztematikus vizsgálatok során különböző áramlási sebességeket, továbbá különböző feszítőerőket állítottam be, s ezek adott beállításai mellett vizsgáltam az áramlási jellemzőket a rács utáni mérőterben. Az általam készített programsor segítségével kalkulált eredmények alapján megállapítottam, hogy a rács aktiválása jelentős hatással volt kialakuló turbulenciára. A turbulenciát szintén jellemző turbulencia-energiaspektrumok vizsgálata rámutatott arra, hogy az ilyen módon előállított turbulencia bizonyos hullámszám-tartományában lokális energia-maximumok jönnek létre. Mivel feltételezésem szerint ez kapcsolatban állhatott a szalagok rezgési frekvenciájával, ezért gyorskamera segítségével is megvizsgáltam a szalagok mozgását különböző referenciasebességek és feszítőerők esetén. A vizsgálatok eredményei alapján megállapítottam, hogy a szalagok rezgési frekvenciája és az energiaspektrumban jelentkező lokális maximumok között szoros kapcsolat áll fenn, hiszen minden vizsgált esetben a rezgési frekvenciának megfelelő hullámszám környezetében figyelhető meg a jelenség. Ezen túlmenően szoros kapcsolatot mutattam ki a szalagok rezgési frekvenciája és az azokat feszítő erő nagysága között.

E vizsgálataimmal egy időben, a Magdeburgban még 2011-ben az általam elvégzett mérések eredményei alapján megtervezett majd összeállított, rugalmas elemekkel ellátott

légsugaras rács aktív elemeinek mozgásformáit is tanulmányoztam. Ehhez elsőként különböző színű aktív elemek mozgását vizsgáltam nagysebességű kamera segítségével. A képsorokat erre a célra általam készített számítógépes programmal dolgoztam fel. Ennek eredményeként megállapítottam, hogy a rugalmas elemek – a rács aktív állapotában – periodikus jellegű mozgást végeznek, azonban a befutott pálya jellege s irányultsága az időben változik, továbbá a gyakori ütközések miatt jelentősen eltérnek egymástól a különböző időintervallumokban vizsgált pályafarmák. A gyorskamerás vizsgálatokat követően az addig használttól nagyobb rugalmasságú csövekkel láttuk el a rácsot, amely változtatástól még aktívabb működést – s ezáltal magasabb turbulenciájú áramlást – lehetett várni. Az ilyen elemeket tartalmazó rácsot a mérésekhez célszerűen átalakítva, azon újabb gyorskamerás méréseket végeztem el az aktív elemek mozgásának leírása céljából. A gyorskamerás eredmények alapján megállapíthattam, hogy a vizsgált, szomszédos csövecskék pályafarmái között értelmezett korrelációs együttható értéke közel zérus, tehát közöttük nem állt fenn lineáris kapcsolat.

Ahhoz, hogy az aktív elemként alkalmazott csövecskéket a célnak történő megfelelés (azaz minél aktívabb működés adott paraméterek esetén) szempontjából leírhasam, összesen három, egymástól független, az aktív elemre jellemző fizikai mennyiségekből képzett dimenziótlan mennyiséget definiáltam. Az előzetes vizsgálatok alatt általam tesztelt aktív elem-variációk fizikai jellemzői alapján meghatároztam az azokhoz tartozó dimenziótlan mennyiségek értékeit, így megadhattam a vizsgált esetekhez tartozó intervallumokat, továbbá a végleges variációhoz tartozó számértékeket.

Csakúgy, mint a szalag-rács esetében, a rugalmas elemekkel szerelt légsugaras rács által létrehozott turbulenciát is szélcsatorna-mérőtérben vizsgáltam *CTA* mérés technikával. E rácsot egy - az általam fejlesztett csatornától nagyobb méretű - Göttingen-típusú szélcsatorna konfúzor-szakasza és a mérőtere közé építettem be olyan módon, hogy a rácson található rugalmas elemek a rács alapáramlással szembeni oldalán helyezkedtek el. A méréseket a rácsból különböző távolságokban, továbbá a ráccsal párhuzamos vonalakban végeztem el négy eltérő referenciasebesség mellett, a rács passzív és aktív állapotában egyaránt. A mérési eredményekből számolt turbulencia-paraméterek alapján megállapítottam, hogy a rugalmas elemekkel ellátott légsugaras rács aktiválása jelentős mértékű turbulencia-növekedést okozott, amelynek következtében számos, a turbulenciát leíró mennyiség értéke jelentősen megváltozott. A turbulencia energiaspektrumai alapján megállapítottam, hogy az aktiválás hatására adott referenciasebesség esetén a passzívhoz képest jobban kialakult, hosszabb tehetetlenségi tartománnyal rendelkező turbulencia jött létre.

A turbulencia-vizsgálatokat követően a légsugaras rács impresszív eredményei alapján érdemesnek tartottam megvizsgálni annak keveredés-intenzifikáló hatását is. Ebből a célból egy olyan mérés technikát fejlesztettem ki, amely alkalmazásával a mesterségesen, még a rács előtt létrehozott inhomogén hőmérsékletű légáram rács utáni síkban vizsgált hőmérsékletmezéjének inhomogenitása alapján lehet következtetni az elkeveredettségek mértékére. Ezzel a technikával négy referenciasebesség, továbbá a rácsból mért négy különböző távolság esetén a rács passzív, fél-aktív majd aktív üzemiállapotaiban vizsgáltam az inhomogenitás mértékét. A hőkamerával készített hőtérképek értékeit erre a célra írt programsorral dolgoztam fel. Eredményképp az egyes esetek normalizált hisztogramjait, továbbá különböző statisztikai mennyiségeket határoztam meg. Megállapítottam, hogy az egyes esetekhez tartozó hisztogramok alakjai, továbbá az hőmérsékletadatok eloszlására jellemző torzultság-értékek szoros kapcsolatban állnak a hőmérsékletmező homogenitásával. A passzív, a fél-aktív és az aktív esetek megfelelő eredményeit összehasonlítva megállapítottam, hogy a rács aktiválása jelentősen homogénebb

hőmérsékletmezőt hoz létre, amely a nagyobb fokú keveredés eredménye, tehát az aktív rács keveredés-intenzifikáló hatása bizonyítást nyert.

Összefoglalóan tehát elmondható, hogy a doktori kutatómunkám során elvégzett vizsgálatok eredményei rámutattak arra, hogy az általam vizsgált s tervezett új típusú, aktív turbulenciagenerátorok alkalmasak a passzív állapotukhoz viszonyítva jelentős mértékű turbulencia létrehozására, amely eredmények a szakirodalmi, aktív rácsokra vonatkozó adatokkal összhangban állnak. Így tehát ezek a rácsok – viszonylagos egyszerű felépítésük ellenére – a jelenleg laboratóriumokban alkalmazott aktív turbulenciagenerátorokhoz viszonyítva költséghatékony alternatívát jelenthetnek.

## 10. SUMMARY

The subject of this dissertation is the development and laboratory tests of two novel active grids applied to turbulence generation. First I present the most significant results of my master course researches performed in Germany, which provided a basis for the current work. Next is a literature review covering the phenomenon of turbulence, the different type of grids applied for the generation of turbulence, and the physical parameters characterizing the quality of the turbulent flow.

I designed a small wind tunnel as the first step in carrying out the necessary experiments. The flow straighteners built into the wind tunnel were optimized by evaluating the velocity measurement data in order to increase the homogeneity of the flow in the test section. Following optimization, homogenous velocity distribution and suitable turbulence levels were obtained in the test section that meet the conditions needed for measuring flow with turbulence generators.

I designed and constructed a vibrating grid and then built it into the test section of the optimized wind tunnel. This grid is able to operate without external energy resources, i.e. the grid can be activated by the flow itself. The grid consists of non-rigid tapes fixed vertically and perpendicular to the mean flow. In its active state (in case of proper mean flow velocity and tensioning force) it moves in a periodic torsional manner. During its active state the vibrating bands frequently modify the value of the grid solidity ratio which represents the grid. Moreover, significant eddy production occurs, generating turbulence. For the first prototype plastic tapes were applied but a more durable solution was sought in later experiments, where the plastic tapes were replaced by steel tapes. The steel tapes required a more robust outer frame to strain them properly, therefore a rigid aluminium frame was assembled. In order to strain each tape individually, a tensioning system containing coil springs adjusted by screws was developed and then attached to the lower part of the frame. Digital dynamometers were connected to each tape in order to adjust the required tensioning force.

The turbulence properties downstream of the grid (in the test section of the wind tunnel) were investigated by means of constant temperature anemometry. During systematic experimental investigation several turbulence quantities describing the flow were evaluated while setting different mean velocity values and different tensioning forces of the tapes. Based on the calculated results obtained from the MATLAB scripts I wrote, I recognised that the evolving turbulence is significantly influenced by the activation of the grid. In the case of the tape grid, unlike the active grids described in the literature, a local spectral energy maximum appeared in a given interval of the wavenumber on the curve of the energy spectra. I hypothesized that a relationship exists between the appearance of energy maximums and the frequency of the fluttering motion of the steel bands. To explore this I used a high-speed camera to capture the vibrations of the tapes under different combinations of velocity and tensioning force. From the analysis (based on my self-developed MATLAB video processing script) I concluded that a relationship exists between the frequency of the motion of the bands and the position of the local maximum in the energy spectra. I found that the wavenumber corresponding to the local spectral energy maximum is in the vicinity of that wavenumber which corresponds to the frequency of the motion of the tapes. Moreover I identified a strong relationship between the mean frequency of the motion of the tapes and the amplitude of the tensioning force applied on them.

A second area of investigation is the motion of the active elements of a new type of jet grid which is equipped with small diameter elastic tubes – as active elements – that was designed

and constructed based on the results of my measurements carried out in 2011 in Magdeburg, Germany. With a high-speed camera I analysed the motion of activated (e.g. high-speed moving at a chaotic manner) active elements using a high-speed camera and active tube ends of different colours as a first step. The records were processed using a MATLAB script that I wrote especially for this purpose. Based on the determined parameters regarding the motion of the investigated tube ends I found that the active motion can be characterized by periodic motion in the active state of the grid. However, the trajectories of the motion and their orientation change with time; furthermore, the orbits recorded in different time intervals show significant differences as a result of frequently occurring collisions. Following the high-speed camera tests the tubes were replaced by more elastic ones in the expectation of more active operation, and thus flow with stronger turbulence. High-speed records were taken again by another type of monochrome high-speed camera to visualise the motion of two new types of active tubes in the modified grid. I found that the value of the correlation coefficient between the orbits of the two adjacent elastic tubes is about zero, which means a linear relationship between the motion of the tubes does not exist.

In order to characterize the applicability of the small tubes as active elements, it was necessary to create non-dimensional parameters related to the activity of the tubes. Therefore – based on Buckingham's Pi theorem – three dimensionless parameters were defined and then calculated which take into account the physical parameters of the tubes as well as the mass flow of the air issuing out from the tube. Domains of the introduced dimensionless parameters were provided in all of the previously investigated active element variations. In addition the exact values related to the optimal active element variation were given.

As for the tape grid, the turbulence properties of the flow downstream of the passive and active states of the jet grid were investigated with the CTA measurement technique. However, the jet grid measurements were carried out in a different wind tunnel than that used for the tape grid experiments. In this case the jet grid was built in following the converging section, at the beginning of the test section of a Göttingen-type wind tunnel. Here the active elements were positioned upstream. The experiments were performed at different distances downstream of the grid as well as in lines parallel to the grid. Four different mean velocities in both active and passive state of the grid were set during the measurements. Based on the results of the CTA measurements it was found that the activation of the grid has significant effects on the turbulence parameters: the turbulence intensity increased and several quantities describing the turbulence changed in a noticeable manner. Based on the turbulence energy spectra derived from the streamwise velocity-component time series it can be stated that of the activation of the grid leads to more developed turbulence, which has a wider inertial range on its spectrum.

Following the impressive results of the turbulence investigation of the jet grid, I thought it worth examining the mixing effect of the grid, as well. I developed a measurement technique in which an inhomogeneous temperature field was artificially created upstream of the grid and the homogeneity of the flow downstream of the grid was investigated by means of thermal camera imaging. For this purpose a porous sheet of felt was fixed in the cross section of the test section at a specified distance from the grid and its temperature distribution was measured. Using the temperature data of the felt sheet it was possible to deduce the homogeneity of the flow, which is closely related to the mixing properties of the grid. With this measurement technique the inhomogeneity of the flow was determined at four different mean velocities at four distances from the grid at three states of the grid (passive, semi-active and active). The thermograms captured by the thermal camera were processed and normalized histograms and

statistical parameters were obtained. I found that the shapes of the histograms and the values of skewness are strongly related to the homogeneity of the temperature field, and thus to the mixing performance of the grid. By comparing the results of the passive, semi-active and active cases I found that the activation of the grid results in a significantly more homogeneous temperature field, which is a result of a higher degree of mixing. Thus the mixing performance of the jet grid has been proved.

In summary, the results of the investigations performed during my research related to the turbulence grids prove that the developed and investigated grids are capable of significantly changing the values of turbulence properties and increasing the turbulence while activated. The results agree well with those presented in the literature. Therefore the developed grids – based on their relatively simple structure– can be a cost-effective, affordable alternative to the active grids currently applied for turbulence generation.

## 11. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK-TÉZISEK

**TÉZIS I.** Bizonyítást nyert, hogy létrehozható egy új típusú, függőleges beépítésű fémszalagokat, mint aktív elemeket alkalmazó turbulencia-generáló rács, amelyhez az áramlási téren kívül elhelyezett merevítőkeret, továbbá arra rögzített szalagonkénti feszítőerő-beállítást biztosító csavarrugós feszítőszerkezet tartozik. Szisztematikus vizsgálatok eredményeként az alábbi főbb megállapítások tehetők:

- Megfelelően nagy ( $U_{ref} = 4-6$  m/s) áramlási sebesség esetén a szalagok aktiválódnak, periodikus torziós mozgást végeznek, amely hatására nő az áramló közeg alapáramlás-irányú turbulencia-foka ( $T_u$ ) és turbulens kinetikus energiája ( $k$ ). Ez a ráctól mért  $x/M = 10 \div 30$  dimenziótlan távolság-intervallumban egyértelműen igazolható volt.
- A rácsot követő áramlási tér vizsgált ( $x/M = 10 \div 30$ ) térrészében kialakuló turbulencia egydimenziós alapáramlás irányú energiaspektrumában ( $E_u(\kappa)$ ) – más, aktív rácsok esetén nem jelentkező – lokális spektrális-energia maximum alakul ki, amely a fémszalagok periodikus mozgására jellemző frekvenciának megfelelő hullámszámhoz ( $\kappa$ ) tartozik. Ezen eltérés a ráctól mért távolsággal együtt fokozatosan elhal és  $x/M > 25$  értékek esetén már nem mutatható ki.
- A vizsgált feszítőerő-intervallum ( $F = 10 \div 16$  N) esetén a fémszalagok periodikus mozgásának frekvenciája a feszítőerő növelésével jó közelítéssel ( $R^2 \sim 0,99$ ) lineárisan nő.

A rács kiemelkedő előnye, hogy az alapáramlás energiáján kívül nem igényel semmilyen kiegészítő energiaforrást, mozgató szerkezetet.

A tézishoz kapcsolódó publikációim: Szaszák & Szabó 2013b; Szaszák & Szabó 2014a,b; Szaszák & Szabó 2015a,b; Szaszák et al. 2016; Szaszák et al. 2017a,b,c,d.

**TÉZIS II.** Szisztematikus fejlesztési tevékenység eredményeképpen kifejlesztésre került egy új típusú légsugar rács, amely esetén – az irodalomban ismert, légsugarat alkalmazó rácsok továbbfejlesztéseként – a légsugarak rugalmas csövecskéken keresztül lépnek be az áramlási térbe. A kiáramló levegő impulzusereje a csöveket intenzív mozgásba hozza, ezzel az időben változó irányú légsugarakkal a rács által indukált turbulencia jellemzői kedvező irányba változnak.

A mozgó elemek gyorskamerával történt vizsgálatát követő számítógépes képfeldolgozás megmutatta, hogy a rács aktív üzemiállapotában a mozgó elemek mozgásformái periodikus jellegűek. A mozgásra azonban jelenetős hatással van a szomszédos aktív elemek és az azokból kiáramló légsugarak interakciója. A rács aktív üzemiállapotában – a megfigyelt időintervallumban ( $t = 3,2$  s) – lineáris kapcsolat nem állt fenn a vizsgált szomszédos elemek között, azaz az aktív elemek pályagörbéi egymástól lineárisan függetlennek tekinthetők.

A tézishoz kapcsolódó publikációim: Szaszák 2012; Szaszák et al. 2012a; Szaszák et al. 2014; Szaszák et al. 2018a; Szaszák et al. 2018b; Szaszák et al. 2019.

**TÉZIS III.** A légsugaras turbulenciagenerátorban alkalmazott aktív elemek aktivitása leírható három újonnan – a Buckingham  $\pi$  elmélet alapján – definiált dimenzió nélküli mennyiséggel. Ezek:

$$C_t = w_t/d_{i,t}, \text{ az aktív elem relatív falvastagsága (falvastagság/belső átmérő);}$$



$C_a = l^*/d_{i,t}$ , az aktív elem relatív hossza, ahol  $l^*$  az aktív elem tömegközéppontjának az aktív csőszakasz kezdetétől mért távolsága;

$C_m = \rho_t E_t d_{i,t}^4 / \dot{m}_t^2$ , mobilitási számnak elnevezett jellemző, amely az elem anyagtulajdonságait (anyagsűrűség, rugalmassági modulus), belső átmérőjét és a dinamikájáért felelős légtömegáramot tartalmazza.

A tézishoz kapcsolódó publikációim: Szaszák et al. 2014; Szaszák et al. 2018b.

**TÉZIS IV.** A kifejlesztett, rugalmas elemekkel felszerelt légsugaras rács passzív üzemállapotában az irodalomban közölt – az alapáramlás irányú turbulencia-fokra vonatkozó –  $T_u = 1,13 \cdot (x/D)^{-5/7}$  összefüggés érvényes a valós  $D = 5$  mm helyett – a rugalmas csövecskék takaró hatását figyelembe vevő –  $D^* = 5,82$  mm virtuális rácsvastagság alkalmazásával. Aktív esetben a passzív esetet leíró összefüggés nyomán a mérési eredményekre illeszthető egy, a különböző áramlási sebességekhez tartozó rács-Reynoldsszámokat ( $Re_M$ ) is figyelembe vevő összefüggés:  $T_u(Re_M) = e^{-7,6 \cdot (\frac{Re_M}{10^5})} \cdot (\frac{x}{D})^{-10/23}$ .

A légsugaras rács aktiválása jelentős hatással van – az  $x/M = 10 \div 50$ ,  $U_{ref} = 3 \div 6$  m/s intervallumban – a szakirodalomban a rácturbulencia jellemzésére elterjedten alkalmazott paraméterekre. A rács aktív üzemkor e hatások a passzív üzemállapot esetén mértekhez arányítva a következők:

- Az alapáramlás irányú turbulencia-fok ( $T_u$ ) az összes vizsgált esetben növekedett. A legkisebb arány ( $T_{u,aktív}/T_{u,passzív} = 1,205$ )  $U_{ref} = 6$  m/s és  $x/M = 10$  esetén adódott, a legnagyobb ( $T_{u,aktív}/T_{u,passzív} = 2,56$ ) pedig  $U_{ref} = 3$  m/s és  $x/M = 50$  esetben.
- A fajlagos turbulens kinetikus energia ( $k$ ) minden esetben növekedett. A legkisebb arányszám ( $k_{aktív}/k_{passzív} = 1,66$ )  $U_{ref} = 6$  m/s és  $x/M = 10$  esetén adódott, a legnagyobb ( $k_{aktív}/k_{passzív} = 6,61$ ) pedig  $U_{ref} = 3$  m/s és  $x/M = 50$  esetben.
- A turbulens kinetikus energia disszipációs rátája ( $\varepsilon$ ) a teljes vizsgálati tartományon növekedett, míg a disszipációs konstans ( $C_\varepsilon$ ) és a Kolmogorov-hosszlépték ( $\eta$ ) értéke csökkent.
- A Taylor-Reynolds-szám ( $Re_\lambda$ ) minden mérési esetben nőtt. A legkisebb arányszám ( $Re_{\lambda,aktív}/Re_{\lambda,passzív} = 1,505$ )  $U_{ref} = 6$  m/s és  $x/M = 10$  esetén adódott, a legnagyobb arány ( $Re_{\lambda,aktív}/Re_{\lambda,passzív} = 5,66$ ) pedig  $U_{ref} = 3$  m/s és  $x/M = 50$  esetben.
- Az egydimenziós, alapáramlás-irányú, normalizált energiaspektrumok ( $E_u(\kappa)$ ) alapján megállapítható, hogy azonos vizsgálati paraméterek esetén a rács aktiválása a passzív esetben kalkulálttól szélesebb, az elméleti,  $-5/3$ -os meredekségű görbét jobban közelítő tehetetlenségi tartományt eredményez.

A tézishoz kapcsolódó publikációm: Szaszák et al. 2018b.

**TÉZIS V.** A kifejlesztett légsugaras rács keveredés-intenzifikáló hatásának laboratóriumi vizsgálatára egy újonnan kifejlesztett hőkamerás mérési eljárás alkalmazható. Ennek alapja a rács előtt létrehozott inhomogén hőmérsékletmező változásának a rácsot követő mérőterben hőkamerával történő vizsgálata. Az inhomogén hőmérsékletmező előállítása a rácsot megelőzően, az áramló levegő egy részének villamos fűtésével történik. A mérőterben

kialakuló áramlás adott keresztmetszetbeli hőmérsékletmezőjének meghatározásához egy – alacsony áramlási ellenállású – porózus emissziós-felület kerül beépítésre az alapáramlás irányára merőlegesen. E felület hőmérséklet-eloszlása jellemzi a keresztmetszetbeli keveredettséget, amely a felületről készült hőképpel rögzíthető. Az elkészült hőtérképek számítógépes feldolgozásával a keveredést jellemző mennyiségek nyerhetők. A vonatkozó mérések a légsugaras rács passzív, fél-aktív és aktív állapotai esetén  $U_{ref} = 1,5 \div 3$  m/s és  $x/M = 10 \div 40$  intervallumokban történtek. Az adatok feldolgozásával kalkulálhatók a leggyakoribb hőmérséklet-értékkel normalizált hisztogramok, valamint a hőmérsékletmező homogenitásával egyértelmű kapcsolatban álló torzultság értékek.

A normalizált hisztogramok alapján megállapítható, hogy a vizsgált esetekben a hőmérsékletmező homogénebbé tehető a ráctól mért távolság növelésével, az áramlási sebesség csökkentésével, továbbá a rács aktiválásával. Bármely vizsgált sebesség- és rács-mód beállítás esetén a távolság növelésével a torzultság-értékek monoton csökkennek. Adott sebesség és távolság mellett a rács aktiválásának növelése rendre csökkenő, míg adott rács-mód és távolság esetén növekvő sebességek rendre növekvő torzultság-értékeket eredményeznek.

A tézishez kapcsolódó publikációim: Szaszák et al. 2018a; Szaszák et al. 2019.

## 12. NEW SCIENTIFIC RESULTS

**CONTRIBUTION 1** A new type turbulence grid was created which consists of metal tapes oriented in vertical direction as active elements and a rigid frame assembled outside of the flow field. The tensioning force of each metal tape is individually adjustable by means of a screw tensioner device assembled on the frame.

Based on systematic investigations the most important findings are:

- In case of sufficiently high ( $U_{ref} = 4-6$  m/s) mean velocity the tapes are activated, performing periodic, torsion-like motion. As a result, the streamwise turbulence intensity ( $T_u$ ) and the turbulence kinetic energy of the flow ( $k$ ) are increased. This finding was verified in the dimensionless distance range of  $x/M = 10 - 30$ .
- In the longitudinal energy spectra  $E_u(\kappa)$  of the investigated interval of ( $x/M = 10 - 30$ ) a local maximum is present, which is not the case in other types of active grids. This belongs to the wavenumber ( $\kappa$ ) corresponding to the frequency of the periodic motion of the metal tapes. The presence of the local maximum gradually decays with the distance from the grid, and at distances of  $x/M > 25$  is not detectable.
- The relationship between the frequency of the periodic motion of the metal tapes and the tensioning force is linear with good approximation ( $R^2 \sim 0.99$ ) in the investigated range of ( $F = 10 - 16$  N).

An outstanding advantage of this grid is that there is no need for an additional energy source for its operation beyond the energy of the main flow.

Related publications: Szaszák & Szabó 2013b; Szaszák & Szabó 2014a,b; Szaszák & Szabó 2015a,b; Szaszák et al. 2016; Szaszák et al. 2017a,b,c,d.

**CONTRIBUTION 2** A new type of jet grid is developed by improving on the jet grids found in the literature, here the jets issue out from moving flexible tubes. The tubes move in an intensive manner caused by the momentum of the air jets. The direction of the jets changes with time, which results in turbulence downstream of the grid with favorable properties.

Based on the image processing of the Hi-Speed camera records of the moving tubes it was found that the motion of the tubes is periodic. However, there is significant effect of the frequent collision of neighboring tubes, as well as the jet interactions. In the active state of the grid, a linear relationship does not exist between the observed two neighboring tubes in the investigated time interval of  $t = 3.2$  s, i.e. the trajectories of the tubes are linearly independent.

Related publications: Szaszák 2012; Szaszák et al. 2012a; Szaszák et al. 2014; Szaszák et al. 2018a, b; Szaszák et al. 2019.

**CONTRIBUTION 3** The “activity” of the active elements used in the jet grid – based on Buckingham’s  $\pi$  theorem – can be characterized by three newly introduced dimensionless numbers. These are the following:

$C_t = w_t/d_{i,t}$ , relative wall thickness of the tube (wall thickness/inner diameter);

$C_a = l^*/d_{i,t}$ , relative length of the tube, where the center of gravity of the active part of the tube measured from its connection is denoted by  $l^*$ ;

$C_m = \rho_t E_t d_{i,t}^4 / \dot{m}_t^2$ , the mobility number which contains the material properties of the tube (density, Young’s modulus), inner diameter, and the mass flow rate of the air jet.

Related publications: Szaszák et al. 2014; Szaszák et al. 2018b.

**CONTRIBUTION 4** The empirical formula concerning the streamwise turbulence intensity found in the literature –  $T_u = 1.13 \cdot (x/D)^{-5/7}$  is valid for the passive case of the developed jet-grid if a virtual thickness of the rod – which takes into account the presence of the tubes with a value of  $D^* = 5.82$  mm – is applied instead of the real thickness of the rod ( $D = 5$  mm). For the active state of the grid another empirical formula can be defined that is a function of the mesh-Reynolds number ( $Re_M$ ):

$$T_u(Re_M) = e^{-7.6 \cdot \left(\frac{Re_M}{10^5}\right)} \cdot \left(\frac{x}{D}\right)^{-10/23}.$$

The activation of the jet-grid has significant effects on the turbulence properties widely used in literature, in the investigated intervals of  $x/M = 10 - 50$ ,  $U_{ref} = 3 - 6$  m/s. The ratios of the values in case of active state to the values belonging to the passive state of the grid are the following:

- The streamwise turbulence intensity ( $T_u$ ) was increased in all investigated cases. The smallest ratio ( $T_{u,aktiv}/T_{u,passzív} = 1.205$ ) resulted at  $U_{ref} = 6$  m/s and  $x/M = 10$ , while the largest value ( $T_{u,active}/T_{u,passive} = 2.56$ ) resulted at  $U_{ref} = 3$  m/s and at  $x/M = 50$ .
- The specific turbulence kinetic energy ( $k$ ) increased in all cases. The smallest value ( $k_{active}/k_{passive} = 1.66$ ) resulted at  $U_{ref} = 6$  m/s and  $x/M = 10$ , while the largest value ( $k_{active}/k_{passive} = 6.61$ ) resulted at  $U_{ref} = 3$  m/s and  $x/M = 50$ .
- The dissipation rate of turbulence kinetic energy ( $\varepsilon$ ) increased in all cases, while the dissipation constant ( $C_\varepsilon$ ) and the Kolmogorov lengths scale ( $\eta$ ) decreased when in active state. Taylor-Reynolds number ( $Re_\lambda$ ) increased in all cases. The smallest ratio ( $Re_{\lambda,active}/Re_{\lambda,passive} = 1.505$ ) resulted at  $U_{ref} = 6$  m/s and  $x/M = 10$ , while the largest value ( $Re_{\lambda,active}/Re_{\lambda,passive} = 5.66$ ) resulted at  $U_{ref} = 3$  m/s and  $x/M = 50$ .
- Based on the longitudinal, one-dimensional energy spectra ( $E_u(\kappa)$ ) it was found that in case of the same measurement conditions, the activation of the grid resulted in a wider inertial subrange which follows better the theoretical  $-5/3$  curve.

Related publication: Szaszák et al. 2018b.

**CONTRIBUTION 5** A newly developed thermal imaging camera measurement technique can be applied for investigating the intensification of the mixing effect of the developed jet-grid. This technique is based on the measurement of the inhomogeneity of the temperature field downstream of the grid. The strongly inhomogeneous temperature field is created upstream of the grid in the center line of the wind tunnel by means of an electrical heater. A low-flow-resistance porous felt sheet is inserted perpendicular to the mean flow in the test section downstream of the grid. The temperature distribution of the surface of the sheet characterizes the degree of mixing, which can be investigated by a thermal camera. By computer processing of the thermograms, quantities related to the mixing can be obtained. Measurements were performed in the passive, semi-active, and active grid states in the intervals of  $U_{ref} = 1.5 - 3$  m/s and  $x/M = 10 - 40$ . Histograms of the temperature fields normalized by the most frequent value (modus) and the skewness values were calculated, which are clearly related to the homogeneity of the temperature field.

Based on the normalized histograms it was found in the investigated cases– that a more homogeneous temperature field can be obtained by increasing the distance from the grid or by decreasing the mean velocity of the flow, furthermore by activating the grid. The values of skewness monotone decrease with increasing distance in case of all investigated mean velocities and grid states. At a given mean velocity and distance, decreasing values of skewness were found with increasing activity of the grid. At a given grid state and distance, the values of skewness increased with the velocity.

Related publications: Szaszák et al. 2018a; Szaszák et al. 2019.

### 13.GYAKORLATI HASZNOSÍTHATÓSÁG ÉS TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

A kifejlesztett rácsok eredményei igazolták, hogy mindkét rács esetén jelentős turbulencia-növekedés érhető el kis áramlási sebességek esetén. A szalag-rács előnye abban rejlik, hogy az aktiválásához nem szükséges külső energiaforrás, így tehát igen egyszerű felépítésű, s költséghatékonyan üzemeltethető. A szalag-rács hasznosíthatóságát mégis inkább olyan területen képzelem el, ahol a kialakított nagyobb intenzitású turbulencia keverési feladatokat láthat el, mivel az elvégzett vizsgálatok alapján több esetben is jelentősebb mértékű anizotrópia jellemzi a kialakult turbulenciát. Ilyen alkalmazás lehet például poros gázokat – például pernyetartalmú füstgázokat – szállító csővezeték-hálózatba történő beépítés, ahol a csőhálózat bizonyos részein (például könyökökben, ívekben) porlerakódás vagy porcsóva alakulhat ki, amennyiben alacsony mértékű a turbulencia. A beépített rács által keltett intenzívebb turbulencia révén a porlerakódások megszüntethetők, továbbá a porcsóvák is szétverhetők, így védve a csőrendszert azok abrazív, koptató hatásától. Emellett acélszalagok alkalmazása esetén a rács viszonylag magas füstgázhőmérséklet esetén is beépíthető a rendszerbe. E rácsok által igényelt energiátöbbletet a csőrendszerbeli áramlást létrehozó ventilátor teljesítménytöbbletével lehet fedezni, így nem szükséges további rendszerelemek beépítése. A jövőben éppen ezért olyan vizsgálatokat is érdemes lehet elvégezni, amelyek esetén portartalmú gázt áramoltatunk keresztül a rácson annak aktív s passzív állapotában egyaránt. A rácsot követően a por kiülepedési fokából lehetne következtetni a rács ilyen célú felhasználhatóságára. Amennyiben a szalag-rácsot laboratóriumi vizsgálatokhoz, turbulencia generálásához kívánjuk alkalmazni, úgy a továbbfejlesztési irány az általa létrehozott turbulencia izotrópiájának javítását célzó megoldás lehetne. Ennek egyik módja a már megépített, függőleges (z) irányultságú szalagokra merőleges, tehát vízszintes (y) irányú szalag-rácsnak a jelenlegi rendszerhez történő hozzáillesztése.

A rugalmas elemeket tartalmazó légsugaras rács – annak meggyőző eredményei alapján – kifejezetten alkalmas a jelenleg elterjedten alkalmazott, Makita-féle aktív turbulenciagenerátorok helyettesítésére vagy kiváltására, hiszen számos esetben azokhoz hasonló paraméterekkel rendelkező turbulenciát képes produkálni. Ehhez a típusú rácshoz – annak működési elvéből adódóan – préslevegőre van szükség, így természetesen egy megfelelően méretezett légkompresszor is nélkülözhetetlen annak működtetéséhez, azonban a préslevegő mennyiségének szabályzásával beállítható a rács aktivitása, ezáltal az adott vizsgálathoz szükséges (bizonyos tartományon belüli) paraméterekkel bíró turbulencia hozható létre. E típusú rács – laboratóriumi alkalmazásához kapcsolódó – továbbfejlesztését az aktív elemek módosításában, átalakításában látom. A bemutatott szakirodalom alapján látható, hogy a legelterjedtebb, Makita-féle aktív rács működésének alapja a rács kitöltési tényezőjének ( $\sigma$ ) időben történő gyors változtatása. Ezt az általam fejlesztett légsugaras rács felépítéséből adódóan csak kis mértékben képes variálni (a kis külső átmérőjű aktív elemek mozgásuk közben viszonylagosan kismértékben változtatják a rács geometriailag effektív kitöltési tényezőjét). Ennek növelése céljából érdemes lenne a jelenleg alkalmazott csővecskék aktív, szabadon mozgó végei közelében azokra elhanyagolható tömegű testeket (például a tengelyüknél a csővekre illesztett 10-20 mm átmérőjű korongokat) rögzíteni. Ezzel a megoldással attól függően, hogy éppen milyen irányultságú az aktív elem, a vékony korongok vetülete a közel elhanyagolható és a teljes korong-keresztmetszet között változna. Ettől a fejlesztési megoldástól tehát jelentősen változó kitöltési tényező, s így még intenzívebb

turbulencia várható. A légsugaras rács másik, általam is vizsgált alkalmazási területe különböző fizikai/kémiai minőségű gázok intenzív keverése lehet. Aktív keverők számos ipari alkalmazás esetén előnyösen alkalmazhatók, ahol a passzív keverőkhöz viszonyított rövidebb keveredési úthossz az elvárás. Az egyik módszer szerint akár az alapáramlásba (primer) a rácson való áthaladás előtt bevezetett szekunder gáz keverése lehet a cél magával a primer gázzal, esetleg egy tercier prés-gázzal; másik módszerként csupán az aktív elemekbe, mint prés-gáz is bevezethető az elkeverendő gáz, amely az alapáramlással intenzíven, rövid úthosszon keveredik el. Ezért a későbbiekben érdemes lenne más mérési módszerekkel is megvizsgálni, hogy milyen mértékű keveredés-intenzifikálás érhető el a légsugaras rács segítségével, s a keveredési fokot a szakirodalomban használt paraméterekkel (pl. keveredettségi-index (Danckwerts, 1952), vagy a relatív szórás (Pahl & Muschelknautz, 1982)) is célszerű lenne meghatározni ahhoz, hogy a rács ilyen irányú alkalmazhatóságát számszerűsíteni lehessen.

Miskolc, 2018. december 16.

Szaszák Norbert Tibor  
okleveles energetikai mérnök

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Mindenekelőtt szeretném megköszönni doktori témavezetőmnek, Prof. Szabó Szilárdnak a kutatómunkám teljes ideje során nyújtott szakmai segítségét mind a mérési feltételek megteremtésében, mind a kísérleti munka elvégzésében és kiértékelésében, mind pedig az értekezésem minél színvonalasabb munkává válásának szakszerű, jelentékeny támogatásában. A szakmai vezetése, iránymutatása és számos esetben a kutatási eredmények alapos és következetes kritikája jelentős segítséget és motivációt jelentett a kutatómunkám során.

Köszönet illeti a magdeburgi „Otto von Guericke” Egyetem Áramlástechnikai és Termodinamikai Intézetének igazgatóját, Dominique Thévenin professzort és kollégáját, Dr. habil. Janiga Gábort a több alkalommal számomra biztosított szakmai, műszaki és anyagi támogatásért, amelyek mind hozzájárultak a dolgozat elkészítéséhez.

Továbbá szeretném köszönetemet kifejezni Dr. Bencs Péter kollégámnak, aki számos laboratóriumi vizsgálatom során segített szakmai tapasztalataival. Tanszékvezetőként is kiemelten támogatta a PhD fokozatom megszerzését külföldi szakmai konzultációk lehetőségének megteremtésével, valamint a kutatásomhoz szükséges mérőberendezések biztosításával.

Köszönettel tartozom a tanszéki laboratórium műszaki szolgáltatóinak, Farkas Lászlónak és Ramada Zoltánnak, akik számos esetben segítettek a méréseimhez szükséges berendezések összeállításában.

Köszönet illeti továbbá a Tanszék összes munkatársát, akik a legkülönfélébb módon járultak hozzá ahhoz, hogy eredményes kutatómunkát végezhettem. Külön köszönettel tartozom Baranyi László professzor úrnak és Robin Nagano Lee asszonynak, akik a munkám során számos alkalommal, nagy precizitással végezték el az angol nyelvű szakmai szövegek lektorálását.

Végül, de nem utolsó sorban kifejezetten szeretném megköszönni páromnak, barátaimnak, továbbá családomnak, kiváltképp édesanyámnak, édesapámnak és húgomnak a kitartó türelmüket, akik minden tekintetben támogatták a doktori kutatómunkámat, majd pedig a doktori értekezésem elkészítését.

*A kutatómunka az Európai Unió és a magyar állam támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával, a GINOP-2.3.4-15-2016-00004 projekt keretében valósult meg, a felsőoktatás és az ipar együttműködésének elősegítése céljából.*



## AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN MEGJELENT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

### *Magyar nyelven*

Szaszák, N., Mátrai, Zs., Szabó, Sz.: "Mini szélcsatorna sebességeloszlásának beállítása áramlásrendező beépítésével." GÉP LXIII:(9), pp. 53-56. 2012b.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Légcsatorna fejlesztése turbulenciagenerátorok vizsgálatához." Proc. OGÉT 2013, XXI. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Konferencia helye, ideje: Arad, Románia, 2013.04.25.-2013.04.28., pp. 372-375. 2013a.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Rugalmas szalagok, mint aktív turbulenciagenerátorok laboratóriumi vizsgálata." Multidiszciplináris tudományok vol. 3(2), pp. 327-336. 2013b.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Rugalmas szalagok alkalmazhatóságának vizsgálata turbulencia generálásához." Proc. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka (FMTÜ), Konferencia helye, ideje: Kolozsvár, Románia. 2014.03.20.-2014.03.21., pp. 365-368. 2014b.

Szaszák, N., Dorogi, D., Roloff, C., Thévenin, D., Szabó, Sz.: "Turbulenciagenerátorban használt aktív elemek mozgásának vizsgálata nagysebességű kamera alkalmazásával." Multidiszciplináris tudományok vol. 4(1), pp. 103-114. 2014.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Új típusú, turbulencia-generáló aktív rács laboratóriumi vizsgálata állandó hőmérsékletű légssebességmérő technika alkalmazásával." A XX. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszak előadásai: Proceedings of the XX<sup>th</sup> International Scientific Conference of Young Engineers. Konferencia helye, ideje: Kolozsvár, Románia, 2015.03.19., pp. 279-282. 2015a.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Szélcsatornába beépített fémszalagrács után kialakuló áramlás vizsgálata hődrótos mérés technika alkalmazásával." Proc. OGÉT 2015: XXIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó. Konferencia helye, ideje: Csíksomlyó, Románia, 2015.04.23.-2015.04.26., pp.342-345, 2015b.

Szaszák, N., Szabó, Sz., Bencs, P.: "Aktív rács keltette turbulencia jellemzőinek meghatározása hődrótos adatok alapján." Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok vol. 12(4), pp. 103-111. 2017d.

### *Idegen nyelven*

Szaszák, N.: "Experimental characterization of a cost-effective active grid for turbulence generation." diplomamunka, Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszék („Otto von Guericke” University of Magdeburg), 2012.

Szaszák, N., Bordás, R., Mátrai, Z., Thévenin, D., and Szabó, S.: "Experimental characterization of a cost-effective semi-active grid for turbulence stimulation." Proc. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'12). Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2012.09.04.-2012.09.07., pp. 362-368. 2012a.

Szaszák, N.: "Development of small size wind tunnel for investigation of turbulence generators." Tavaszi Szél Konferencia. Konferencia helye, ideje: Sopron, Magyarország, 2013.05.31.-2013.06.02., pp. 218-225. 2013.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Experimental study of elastic tapes in wind tunnel as turbulence generator.", 28<sup>th</sup> microCAD Nemzetközi Multidiszciplináris Tudományos Konferencia. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország. 2014.04.10.-2014.04.11., pp. 9-17. 2014a.

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: "Effects of tension of fluttering tapes on turbulent flow properties downstream of an active grid", 2<sup>nd</sup> International Conference on Engineering Sciences and Technologies (ESAT 2016). Konferencia helye, ideje: Matlárháza, Szlovákia, 2016.06.29.-2016.07.01., pp. 1-9. 2016.

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: "Experimental investigation of the effects of tensile force on the characteristics of turbulence downstream of a novel active grid." Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II: Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies, Konferencia helye, ideje: Matlárháza, Szlovákia, 2016.06.29.-2016.07.01., CRC Press/Balkema, pp. 261-266. 2017a. **SCOPUS-indexált.**

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: "Determining turbulent properties in grid generated turbulence based on hot-wire data." International Conference on Innovative Technologies: IN-TECH. Konferencia helye, ideje: Ljubljana, Szlovénia, 2017.09.11.-2017.09.13., pp. 149-152. 2017b.

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: "Influence of flat tape grid on the turbulence properties of airflow in a wind tunnel." International Conference on Innovative Technologies: IN-TECH. Konferencia helye, ideje: Ljubljana, Szlovénia, 2017.09.11.-2017.09.13., pp. 149-152. 2017c.

Szaszák, N., Szabó, Sz., Bencs, P.: "Enhancement of mixing in gas medium by means of active turbulence generator." 3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies, ESAT 2018. Konferencia helye, ideje: Matlárháza, Szlovákia, 2018.09.12.-2018.09.14., pp. 1-4. 2018a.

Szaszák, N., Roloff, C., Bordás, R., Bencs, P., Szabó, S., Thévenin, D.: "A novel type of semi-active jet turbulence grid." Heliyon, vol. 4(12), e01026, pp. 1-25. 2018b. **SCOPUS-indexált, SJR(2017): 0,355.**

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: "Intensification of turbulent mixing in gases by means of active turbulence grid." Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II: Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. Konferencia helye, ideje: Matlárháza, Szlovákia, 2018.09.12.-2018.09.14. CRC Press/Balkema, pp. 1-6. 2019. **SCOPUS-indexált. Közlésre elfogadott cikk, várható megjelenés: 2019.**

## A SZERZŐ EGYÉB TÉMÁKBAN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓI

Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Szárnykerekes mérőt tartalmazó áramlásmérő szakasz kalibrációja erre a célra létrehozott mérőberendezéssel." Proc. OTDK 2011 Baja, XXX. Jubileumi Országos Tudományos Diákköri Konferencia, Baja, pp. 161.(kivonatolt). 2011.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Elemző számítások Stockholm és Csíkszereda városban rendelkezésre álló napenergia hasznosítására." Proc. OGÉT 2011, XIX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Csíkszereda, Románia, pp. 339-342. 2011.

Lakatos, K., Szaszák, N., Mátrai, Zs., Soltész, L., Szabó, Sz.: "Experimental development of guide vanes and return guide vanes of a mini blower." Proc. MicroCAD 2011, International Computer Science Conference, Miskolc, pp. 65-72. 2011.

Lakatos, K., Szaszák, N., Mátrai, Zs., Szabó, Sz.: "Monoblokk rendszerű mini fúvó vezető és visszavezető kerekai kialakításának analízise méréssel." Szivattyúk, kompresszorok, Vákuumszivattyúk vol. 18, pp. 65-71. 2011.

Mátrai, Zs., Szaszák, N.: "LDV measurement uncertainties in an artificial aneurysm model." Gépészet 2012. Proc. of the Eighth International Conference on Mechanical Engineering. Budapest, pp. 330-336. 2012.

Mátrai, Zs., Roloff, C., Bordás, R., Szaszák, N., Szabó, Sz., Thévenin, D.: "Investigation of the velocity field in a full-scale artificial medical model." Proc. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'12). The 15th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, pp. 136-143. 2012.

Mátrai, Zs., Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Measuring of Velocity field in an Artificial Model." Proc. MicroCAD '13 International Computer Science Conference, Miskolc, paper Nr. 4. pp. 1-6. 2013.

Roloff, C., Bordás, R., Nickl, R., Mátrai, Zs., Szaszák, N., Szabó, Sz., Thévenin, D.: "Investigation of the velocity field in a full-scale model of a cerebral aneurysm." International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 43, pp. 212-219. 2013. **SCOPUS-indexált; 8 független hivatkozás; SJR(2017): 0,95.**

Bodnár, I., Szaszák, N.: „Gőztől a benzinig, benzintől a fagázig, avagy a fagázüzemű gépek fejlődéstörténete.” Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT): VIII. Tudomány- és Technikatörténeti Konferencia, Belényes, Románia, pp. 25-31. 2015.

Koós, D., Szaszák, N., Bodnár, I., Boldizsár, Cs.: "Temperature dependence of solar cell's efficiency." Acta Technica Corviniensis- Bulletin of Engineering vol. 9(2), pp. 107-110. 2016.

Boldizsár, Cs., Bodnár, I., Szaszák, N., Koós, D.: „Designing procedure of innovative photovoltaic solar water heater system.” Acta Technica Corviniensis- Bulletin of Engineering vol. 9(2), pp. 71-74. 2016.

## IRODALOMJEGYZÉK

- Ahmadi-Baloutaki, M., Carriveau, R., Ting, D. S.-K.: “*Performance of a vertical axis wind turbine in grid generated turbulence.*” Sustainable Energy Technologies and Assessments vol. 11, pp.178-185. 2015.
- Antonia, R. A., Lavoie, P., Djenidi, L., Benaissa, A.: “*Effect of a small axisymmetric contraction on grid turbulence.*” Experiments in Fluids vol. 49(1), pp. 3-10. 2010.
- Aufderheide, T., Bode, C., Friedrichs, J., Kozulovic, D.: “*The generation of higher levels of turbulence in a low-speed cascade wind tunnel by pressurized tubes.*” 11<sup>th</sup> World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 2014.
- Bayly, B. J., Orszag, S. A., Herbert, T.: “*Instability mechanisms in shear-flow transition.*” Annual review of fluid mechanics, vol. 20(1), pp. 359-391. 1988.
- Bedat, B., Cheng, R. K.: “*Experimental study of premixed flames in intense isotropic turbulence.*” Combustion and Flame vol. 100(3), pp. 485-494. 1995.
- Blanchet, G., Charbit, M.: “*Digital Signal and Image Processing using MATLAB*” könyv, ISTE Ltd. 2006.
- Boquillon, O., Glegg, S., Larssen, J. V., Devenport, W. J.: “*The Interaction of Large Scale Turbulence with a Cascade of Flat Plates.*” 9<sup>th</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit. 2003.
- Bordás, R., Hagemeyer, T., Wunderlich, B., Thévenin, D.: “*Droplet collisions and interaction with the turbulent flow within a two-phase wind tunnel.*” Physics of Fluids vol. 23(085105), pp. 1-11. 2011.
- Bordás, R., Roloff, C., Thévenin, D., Shaw, R.: “*Experimental determination of droplet collision rates in turbulence.*” New Journal of Physics vol. 15(045010), pp. 1-31. 2013.
- Bradshaw, P.: “*An introduction to turbulence and its measurement: thermodynamics and fluid mechanics series.*” Elsevier. 2013.
- Brand, L.: “*The Pi theorem of dimensional analysis.*” Archive for Rational Mechanics and Analysis, vol. 1(1), pp. 35-45. 1957.
- Burattini, P., Lavoie, P., Antonia, R. A.: “*Velocity derivative skewness in isotropic turbulence and its measurement with hot wires.*” Experiments in fluids, vol. 45(3), pp. 523-535. 2008.
- Cekli, H. E., Water, W. v. d.: “*Tailoring turbulence with an active grid.*” Exp. Fluids vol. 49, pp. 409-416. 2010a.
- Cekli, H. E., Tipton, C., Water, W. v.d.: “*Resonant enhancement of turbulent energy dissipation.*” Phys Rev Lett vol. 105(4), pp. 503. 2010b.
- Chiekh, M. B., Bera, J.-C., Sunyach, M.: “*Synthetic jet control for flows in a diffuser: vectoring, spreading and mixing enhancement.*” Journal of Turbulence vol. 4(32) pp. 1-12. 2003.
- Czibere, T., Szabó, Sz., Janiga, G., Kecke, H.J., Praetor, R.: “*Vergleich von mit unterschiedlichen Turbulenzmodellen berechneten Geschwindigkeitsprofilen.*” Micro CAD International Computer Science Conf. kiadványa. Konferencia helye és ideje: Miskolc, 1999. 02. 24.-25., Section M, pp. 71-74. 1999.
- Czibere, T., Szabó, Sz., Juhász, A., Farkas, A., Janiga, G.: “*Measuring Turbulent Pipe Flow*” Micro CAD International Computer Science Conf. kiadványa. Konferencia helye és ideje: Miskolc, 1999. 02. 24.-25., Section M, pp. 75-79. 1999.
- Czibere, T., Szabó, Sz., Janiga, G., Farkas, A., Praetor, R.: “*Experimental and Theoretical Analysis of a Coaxial Cylindrical Channel Flow*” Micro CAD International Computer Science Conf. kiadványa. Konferencia helye és ideje: Miskolc, 2001. 03. 01.-02., pp. 25-31., 2001.
- Coffey, C. J., Hunt, G. R., Seoud, R. E., Vassilicos, J. C.: “*Mixing effectiveness of fractal grids for inline static mixers.*” Imperial College London. 2007.
- Charnay, G.: “*Etude d'une couche limite perturbée par une turbulence extérieure.*” Ecole Centrale de Lyon, Lab. de Mécanique des Fluides. Ph.D. Thesis. 1969.
- Comte-Bellot, G., Corrsin, S.: “*The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence.*” Journal of Fluid Mechanics, vol. 25(4), pp. 657-668. 1966.

- Comte-Bellot, G.: “Simple eulerian time correlation of full- and narrow-band velocity signals in grid-generated, isotropic turbulence.” *Journal of Fluid Mechanics* vol. 48(2), pp. 273-337. 1971.
- Comte-Bellot, G.: “Hot-Wire anemometry.” *Annu. Rev. Fluid Mech.* vol. 8, pp. 209-231. 1976.
- Danckwerts, P. V.: “The definition and measurement of some characteristics of mixtures.” *Applied Scientific Research, Section A* vol. 3(4), pp. 279-296. 1952.
- Danesh-Yazdi, A. H., Goushcha, O., Elvin, N., Andreopoulos, Y.: “Fluidic energy harvesting beams in grid turbulence.” *Experiments in Fluids* vol. 56(161). 2015.
- Davidson, L.: “Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling.” Division of Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. 2014.
- De Silva, I. P. D., Fernando, H. J. S.: “Oscillating grids as a source of nearly isotropic turbulence.” *Physics of Fluids*, vol. 6(7), pp. 2455-2464. 1994.
- Discetti, S., Ziskin, I. B., Astarita, T., Adrian, R. J., Prestridge, K. P.: “PIV measurements of anisotropy and inhomogeneity in decaying fractal generated turbulence.” *Fluid Dyn. Res.* vol. 45(6), 061401, pp. 1-23. 2013.
- Djenidi, L., Tardu, S. F.: “On the anisotropy of a low-Reynolds-number grid turbulence” *J. Fluid Mech.*, vol. 702, pp. 332-353. 2012.
- Djenidi, L., Tardu, S., Antonia, R. A.: “On the ergodicity of grid turbulence.” 8<sup>th</sup> International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-8) Poitiers, France, 2013.08.28.-30. 2013.
- Evans, J. D.: “Straightforward statistics for the behavioral sciences.” Pacific Grove, CA: Brooks/Cole Publishing. 1996.
- Fischer, A., Lutz, T., Krämer, E., Cordes, U., Hufnagel, K., Tropea, C., Kampers, G., Hölling, M., Peinke, J.: “Numerical and experimental investigation of an airfoil with load control in the wake of an active grid.” *Journal of Physics: Conference Series* vol. 753, pp 1-10. 2016.
- Fransson, J. H. M., Alfredsson, P. H.: “On the disturbance growth in an asymptotic suction boundary layer.” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 482, pp. 51-90. 2003.
- Fransson, J. H. M., Matsubara, M., Alfredsson, P. H.: “Transition induced by free-stream turbulence.” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 527, pp. 1-25. 2005.
- Gad-el-Hak, M., Corrsin, S.: “Measurements of the nearly isotropic turbulence behind a uniform jet grid.” *Journal of Fluid Mechanics* vol. 62(1), pp. 115-143. 1974.
- Ghanem, A., Lemenand, T., Valle, D. D., Peerhossaini, H.: “Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods – A review.” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92(2), pp. 205-228. 2014.
- Goepfert, C., Marié, J.L., Chareyron, D., and Lance, M.: “Characterization of a system generating a homogeneous isotropic turbulence field by free synthetic jets.” *Experiments in Fluids* vol. 48(5), pp. 809-822. 2010.
- Guillon, O.: “Essais de mise au point d’une grille active à grandes mailles.” Ecole Centrale de Lyon, Lab. de Mécanique des Fluides, Ph.D. Thesis. 1968.
- Hobbs, D. M., Muzzio, F. J.: “The Kenics static mixer: a three-dimensional chaotic flow.” *Chemical Engineering Journal*, vol. 67(3), pp.153-166. 1997.
- Hurst, D., Vassilicos, J. C.: “Scalings and decay of fractal-generated turbulence.” *Phys. Fluids* vol. 19(3), 035103. 2007.
- Hwang, W., Eaton, J.K.: “Creating homogeneous and isotropic turbulence without a mean flow.” *Experiments in Fluids* vol. 36(3), pp. 444-454. 2004.
- Janiga, G.: “Kétdimenziós turbulens nyíróáramlások számítása sík, valamint enyhén görbült falakkal határolt csatornában” doktori értekezés, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki Kar, 2002.
- Jørgensen, F. E.: “How to measure turbulence with hot-wire anemometers- a practical guide.” Dantec Dynamics, Dánia, 2002.

- Kang, H.S., Chester, S., Meneveau, C.: “*Decaying turbulence in an active-grid-generated flow and comparisons with large-eddy simulation.*” *Journal of Fluid Mechanics* vol. 480, pp. 129-160. 2003.
- Kistler, A. L., Vrebalovich, T.: “*Grid turbulence at large Reynolds numbers.*” *Journal of Fluid Mechanics* vol. 26(1), pp. 37-47. 1966.
- Knebel, P., Peinke, J.: “*Active grid generated turbulence.*” *Advances in Turbulence XII, proceedings of the 12th EUROMECH European Turbulence Conference, 2009.10.07-10, Marburg, Germany.* Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 903. 2009.
- Kolmogorov, A. N.: “*The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Numbers.*” *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences*, vol. 434. 1890.
- Könözszy, L.: “*Kétdimenziós nyíróáramlások számítása a turbulens örvénydiffúzió differenciálegyenletének megoldásával*” doktori értekezés, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki Kar, 2004.
- Krogstad, P.A.: “*Turbulent decay in the near field of multi-scale and conventional grids.*” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 35, pp. 102-108. 2012.
- Kundu, P. K.: Cohen, I. M.: “*Fluid Mechanics.*”, 2<sup>nd</sup> Ed. Academic Press. 2002.
- Kurian, T., Fransson, J. H. M.: “*Grid-generated Turbulence revisited.*” *Fluid Dyn. Research*, vol. 41, pp 1-32. 2009.
- Laizet, S., Vassilicos, J. C.: “*Stirring and mixing by grid-generated turbulence in the presence of a mean scalar gradient.*” *International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-8) 2013.09.28-30., Poitiers, France.* 2013.
- Larssen, J. V., Devenport, W. J.: “*The Generation of High Reynolds Number Homogeneous Turbulence.*” 32<sup>nd</sup> American Institute of Aeronautics and Astronautics: Fluid Dynamics Conference and Exhibit, pp. 1-7. 2002.
- Larssen, J.V., Devenport, W.J.: “*On the generation of large-scale homogeneous turbulence.*” *Experiments in Fluids* vol. 50, pp. 1207-1223. 2011.
- Lavoie, P., Antonia, R. A., Djenidi, L.: “*Effect of Grid Geometry on the Scale-By-Scale Budget of Decaying Grid Turbulence.*” 15<sup>th</sup> Australasian Fluid Mechanics Conference, 2004.12.13.-17., University of Sydney, Sydney, Australia, pp. 13-17. 2004.
- Lavoie, P., Avallone, G., De Gregorio, F., Romano, G. P., Antonia, R. A.: “*Spatial resolution of PIV for the measurement of turbulence.*” *Exp. Fluids*, vol. 43, pp. 39-51. 2007.
- Laws, E. M., Livesey, J. L.: “*Flow through Screens.*” *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 10, pp. 247-266. 1978.
- Lesieur, M.: “*Turbulence in Fluids.*” Fourth Revised Edition, Fluid Mechanics and Its Applications, vol. 84. 2008.
- Ling, S. C. & Wan, C. A.: “*Decay of isotropic turbulence generated by a mechanically agitated grid.*” *Phys. Fluids* vol. 15(8), pp. 1363-1369. 1972.
- Liu, J. C. H., Greber, I., Wiskind, H. K.: “*Experimental measurements of grid injection turbulent flows.*” Case Western Reserve University Tech. Rep. FTAS/TR-70-53. 1971.
- Liu, R., Ting, D. S.-K.: “*Turbulent Flow Downstream of a Perforated Plate: Sharp-Edged Orifice Versus Finite-Thickness.*” *Journal of Fluids Engineering*, vol. 129, pp. 1164-1171. 2007.
- Lohász, M. M., Rékert, T.: “*Turbulencia és modellezése jegyzet*” Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Áramlástan Tanszék, Budapest. 2010.
- Luxenberg, D. S., Wiskind, K.: “*Some effects of air injection on the turbulence generated by a bi-planar grid.*” Case Western Reserve University Tech. Rep. FTAS/TR-69-42. 1969.
- Makita, H., Miyamoto, S.: “*Generation of high intensity turbulence and control of its structure in a low speed wind tunnel.*” *Proc. 2nd. Asian Congress on Fluid Mechanics*, 1983.10.25.-29., Beijing, China, pp. 101-106. 1983.
- Makita, H.: “*Realization of a large-scale turbulence field in a small wind tunnel.*” *Fluid Dynamics Research* vol. 8, pp. 53-64. 1991.

- Makita, H., Sassa, K.: "Active turbulence generation in a laboratory wind tunnel." *Advances in Turbulence* vol. 3, pp. 497-505. 1991.
- Makita, H., Sekishita, N.: "Wind tunnel experiments of large-scale turbulence generated by a turbulent shear flow generator." *The 4<sup>th</sup> International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2006)*, 2006.07.16.-19., Yokohama, pp. 857-860. 2006.
- Marshall, A.; Venkateswaran, P.; Noble, D.; Seitzman, J.; Lieuwen, T.: "Development and characterization of a variable turbulence generation system." *Experiments in Fluids*, vol. 51(611). 2011.
- Mathieu, J., Alcaraz, E.: "Réalisation d'une soufflerie à haut niveau de turbulence." *CR. Acad. Sci.* vol. 261(2435). 1965.
- Mohamed, M. S.; LaRue, J. C.: "The decay power law in grid-generated turbulence." *Journal of Fluid Mechanics* vol. 219, pp. 195-214. 1990.
- Mydlarski, L., Warhaft, Z.: "On the onset of high-Reynolds-number grid-generated wind tunnel turbulence." *Journal of Fluid Mechanics* vol. 320, pp. 331-368. 1996.
- Ozono, S., Nishi, A., Miyagi, H.: "Turbulence generated by a wind tunnel of multi fan type in uniformly active and quasi-grid modes." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 94, pp. 225-240. 2006.
- Ozono, S., Miyagi, H., Wada, K.: "Turbulence generated in active grid mode using a multi-fan wind tunnel." *Journal of Fluid Science and Technology* vol. 2(3), pp 643-654. 2007.
- Pahl, M.H., Muschelknautz, E.: "Static mixers and their applications." *Int. Chem. Eng.* vol. 22 p. 197. 1982.
- Pennycuick, C., J., Alerstam, T., Hedenström, A.: "A new low-turbulence wind tunnel for bird flight experiments at Lund University, Sweden." *Journal of Experimental Biology*, vol. 200, pp.1441-1449. 1997.
- Pinker, R. A., Herbert, M. V.: "Pressure loss associated with compressible flow through square-mesh wire gauzes." *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 9(1), pp.11-23. 1967.
- Podráczki, R.: "Turbulencia-generáló rácsok szakirodalmi áttekintése, a rácsok után kialakuló áramlási paraméterek vizsgálatához alkalmazható PIV és LDV mérés technika bemutatása." komplex feladat, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke. 2015.
- Pope, S. B.: "Turbulent Flows." Cambridge Univ. Press. 2000.
- Reynolds, O. F. R. S.: "XXIX. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels." *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* vol. 174, pp. 935-982. 1883.
- Richardson, L. F.: "Weather Prediction by Numerical Process." Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1922.
- Roach, P. E.: "The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids." *Int. J. Heat Fluid Flow* vol. 8, pp. 82-92. 1987.
- Saarenrinne, P., Piirto, M.: "Turbulent kinetic energy dissipation rate estimation from PIV velocity vector fields." *Experiments in Fluids*, Springer-Verlag, vol. 29(S1), pp 300-307. 2000.
- Saffman P. G.: "Vortex interactions and coherent structures in turbulence." *Transition and turbulence*, pp. 149-166. 1981.
- Sakai, Y., Watanabe, T., Kamohara, S., Kushida, T., Nakamura, I.: "Simultaneous measurements of concentration and velocity in a CO<sub>2</sub> jet issuing into a grid turbulence by two-sensor hot-wire probe." *International Journal of Heat and Fluid Flow* vol. 22(3), pp. 227-236 2001.
- Sato, H., Saito, H.: *Proc. 6th Turbulence Symposium*, vol. 103. 1974. (japán nyelven)
- Schlichting, H., Kestin, J.: "Boundary layer theory." 4<sup>th</sup> ed. New York, MacGrawHill. 1960.
- Shavit, U., Chigier, N.: "Development and evaluation of a new turbulence generator for atomization research." *Exp. in Fluids* vol. 20, pp. 291-301. 1995.
- Simmons, L. F. G., Salter, C.: "Experimental investigation and analysis of the velocity variations in turbulent flow." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A* vol. 145(854), pp. 212-234. 1934.

- Tassa, Y., Kamotani, Y.: “*Experiments on turbulence behind a grid with jet injection in downstream and upstream direction.*” Phys. of Fluids vol. 18(4), pp. 411-414. 1975.
- Teunissen, H. W.: “*An ejector-driven wind tunnel for the generation of turbulent flows with arbitrary mean velocity profile.*” UTIAS Tech. Note 133, University of Toronto. 1969.
- Thole, K. A., Bogard, D. G., Whan-Tong, J. L.: “*Generating high freestream turbulence levels.*” Exp. in Fluids vol.17, pp. 375-380. 1994.
- Thormann, A., Meneveau, C.: “*Decay of homogeneous, nearly isotropic turbulence behind active fractal grids.*” Physics of Fluids vol. 26(2), 025112, pp. 1-28. 2014.
- Tuoc T. K.: “*A theory of turbulence, Part 1: Towards solutions of the Navier-stokes equations.*” arXiv preprint: 0910.2072. 2009.
- Taylor, G. I.: “*The Spectrum of Turbulence.*” Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, vol. 164, no. 919, pp. 476-490. 1938a.
- Taylor, G. I.: “*Production and dissipation of vorticity in a turbulent fluid.*” Proceedings of the Royal Society of London. A 164.916, pp. 15-23. 1938b.
- Thompson, S. M., Turner, J. S.: “*Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid.*” Journal of Fluid Mechanics, vol. 67(2), pp. 349-368. 1975.
- Townsend, A. A.: “*The uniform distortion of homogeneous turbulence.*” The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, vol. 7(1), pp. 104-127. 1954.
- Tsinober A.: “*An informal introduction to turbulence.*” Springer Science & Business Media, vol. 63. 2001.
- Uberoi, M.S.: “*Energy transfer in isotropic turbulence.*”, Physics of Fluids vol. 6(8), pp. 1048-1056. 1963.
- Valente, P. C., Vassilicos, J. C.: “*The decay of turbulence generated by a class of multiscale grids.*” Journal of Fluid Mechanics vol. 687, pp. 300-340. 2011.
- Variano, E. A., Bodenschatz, E., Cowen, E. A.: “*A random synthetic jet array driven turbulence tank.*” Experiments in Fluids, vol. 37(4), pp. 613-615. 2004.
- VDE/VDI-Richtlinien VDE/VDI 3513: “*Schwebekörper-Durchflussmesser: Berechnungsverfahren.*” VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf. 1971.
- Verbeek, A. A., Pos, R. C., Stoffels, G. G., Geurts, B. J., van der Meer, T. H.: “*A compact active grid for stirring pipe flow.*” Experiments in fluids, vol. 54(10), 1594. 2013.
- Villermaux, E., Gagne, Y., Hopfinger, E. J., Sommeria, J.: “*Oscillatory instability and genesis of turbulence behind a high solidity grid.*” European Journal of Mechanics, B/Fluids, vol. 10(4), pp. 427-439. 1991.
- Weitemeyer, S., Reinke, N., Peinke, J., Hölling, M.: “*Multi-scale generation of turbulence with fractal grids and an active grid.*” Fluid Dynamics Research, vol. 45(6), 061407. 2013.
- Yakhot, V., Orszag, S. A.: “*Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory.*” Journal of Scientific Computing, vol. 1(1), pp 3-51. 1986.
- Yoshioka, S., Fransson, J. H. M., Alfredsson, P. H.: “*Free stream turbulence induced disturbances in boundarylayers with wall suction.*” Phys. Fluids vol. 16, 3530. 2004.
- Zhou, Y., Nagata, K., Sakai, Y., Suzuki, H., Ito, Y., Terashima, O., Hayase, T.: “*Relevance of turbulence behind the single square grid to turbulence generated by regular- and multiscale-grids.*” Phys. Fluids vol. 26, 075105. 2014.

## ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra A levegőmeztáplálással ellátott prototípus-rács a rajta elhelyezett rugalmas csövecskékkel (a szabad végükön extra súlyokkal).....	13
2. ábra A prototípus-rács egy elemének műszaki rajza a fontosabb méretekkel.....	14
3. ábra A kezdeti vizsgálatokhoz használt rendszer felépítése.....	15
4. ábra A lokális turbulencia-fok alakulása a rács után passzív és aktív esetben.....	16
5. ábra A turbulens kinetikus energia-értékek aránya ( $k_a/k_p$ ) a vizsgálat síkrészben.....	17
6. ábra Hagyományos és önhasználó mintázatú passzív rácsok.....	21
7. ábra Makita-típusú aktív turbulenciagenerátor (Makita & Sekishita, 2006).....	22
8. ábra Elméleti spektrális energia-eloszlás kialakult turbulencia esetén.....	31
9. ábra A CTA mérés technika mérési lánc.....	33
10. ábra A rezgőszalagos rács vizsgálatához összeállított szélcsatorna.....	36
11. ábra mérőtér-keresztmetszetbeli átlagsebesség ( $U$ ) profil $U_{ref} \approx 3$ m/s esetén.....	38
12. ábra A végleges áramlásrendező-variációt tartalmazó szélcsatorna-szakasz.....	38
13. ábra A két csököteget tartalmazó variáció eredményei adott ventilátor-fordulatszám esetén.....	39
14. ábra A szélcsatornába épített műanyag szalagos rács a csavaros feszítőszerkezettel és a mérés kor alkalmazott koordináta-rendszerrel.....	41
15. ábra A passzív és az aktív üzemi állapotú rács keltette turbulencia-fok alakulása, továbbá a rezgő szalagokról készült hosszú expozíciós idejű felvétel.....	42
16. ábra A vízszintes közepsíkban mért lokális turbulencia-fok értékek a rácstól mért dimenziótlán távolság függvényében.....	42
17. ábra A lokális turbulencia-fok alakulása a csatorna vízszintes közepsíkjában, rezgő szalagok után, $U_{ref} = 2$ m/s esetén.....	43
18. ábra A csatornába épített acélszalag-rács.....	44
19. ábra Az erőmérőkkel ellátott rács 2- és 3 dimenziós rajzai.....	45
20. ábra A rács síkjával párhuzamos vonalakban mért jellemzők.....	47
21. ábra Izotrópia-arány ( $i$ ) a vizsgált mérési esetekben.....	48
22. ábra Alapáramlás irányú turbulencia-fok ( $T_u$ ) alakulása az egyes mérési esetekben, a rácstól mért $x/M$ távolság függvényében.....	49
23. ábra A turbulens kinetikus energia ( $k$ ) alakulása az egyes mérési esetekben.....	50
24. ábra A turbulens kinetikus energia disszipációs rátájának ( $\varepsilon$ ) értékei.....	50
25. ábra A Kolmogorov-hosszlépték ( $\eta$ ) alakulása a vizsgált passzív és aktív esetekben.....	51
26. ábra A Taylor-Reynolds szám ( $Re_\lambda$ ) alakulása az egyes mérési esetekben.....	52
27. ábra Alapáramlás irányú energiaspektrumok, és a $-5/3$ -os meredekségű hatványfüggvényt szemléltető görbék.....	53
28. ábra Az egyik rezgő szalag kamerával rögzített, időben egymást követő pillanatképei (olvasási rendben).....	54
29. ábra A szalagok rezgési frekvenciái ( $f_{sz}$ ).....	54
30. ábra Alapáramlás irányú energiaspektrumok.....	55
31. ábra Alapáramlás irányú energiaspektrumok.....	56
32. ábra Az első gyorskamera-vizsgálatokhoz összeállított rács.....	58
33. ábra A bordó csővég $t$ időpillanatbeli pozíciójának keresése a $t_0$ idején készített képen lévő pozícióhoz képest.....	59
34. ábra A vizsgált csővégek pixel-elmozdulásai egy-egy képkocka között.....	60



35. ábra Hat vizsgált csővég által bejárt pályák arányos nyomvonalai a 0÷500 ms időintervallumban.....	60
36. ábra Az 5. csővég pályaformái különböző időintervallumokban, két, időben máskor rögzített képsor esetén.....	61
37. ábra A 4. csővég átlagos pozíciójához viszonyított $y$ és $z$ irányú kitérései az idő függvényében, 0÷500 ms időintervallumban. ....	62
38. ábra A 7. (fehér színű) csővég 1÷500 ms intervallumban befutott pályája és a pálya középpontjától mért $y$ és $z$ irányú kitérések az idő függvényében, az egyes ütközéseket szemléltető képkivágásokkal .....	62
39. ábra Különböző aktív elemek végeinek sebesség-idő függvénye az 1÷250 ms-os intervallumban.....	63
40. ábra a turbulencia-vizsgálatokhoz használt, végső légsugaras-rács variáció egy elemének műszaki rajza.....	65
41. ábra A gyorskamerás és a turbulencia-vizsgálatokhoz használt rács részlete.....	66
42. ábra A letakarás nélküli, sötét részeket is tartalmazó képkocka és a szürke színű letakarással készített kép.....	67
43. ábra A két vizsgált csővég (1 és 2) mozgásának nyomvonalai 3,2 másodperces időintervallumban.....	68
44. ábra A vizsgálatokhoz összeállított mérőrendszer. ....	73
45. ábra Az izotrópia-arány ( $i$ ) passzív és aktív esetben.....	77
46. ábra Az áramlás homogenitása: a pontbeli átlagsebességek referenciasebességhez viszonyított aránya.. ....	78
47. ábra A passzív üzemű (üres jelölők) és az aktivált rács (teli jelölők) esetén mért $T_u$ értékek a ráctól mért távolság függvényében .....	79
48. ábra Az aktív és a passzív esethez tartozó $T_u$ értékpárok aránya. ....	80
49. ábra A turbulens kinetikus energia alakulása a ráctól mért távolság függvényében, az aktív és a passzív értékpárok aránya. ....	81
50. ábra A turbulens kinetikus energia disszipációs rátájának ( $\varepsilon$ ) alakulása a ráctól mért távolság függvényében.....	82
51. ábra A disszipációs konstans ( $C_\varepsilon$ ) alakulása a mérőtér középvonalában, log-log skálán ábrázolva.....	83
52. ábra A Kolmogorov-hosszlépték ( $\eta$ ) alakulása a mérőtér középvonalában.....	84
53. ábra a.) A Taylor-Reynolds-szám ( $Re_\lambda$ ) alakulása a szélsatorna középvonalában.....	85
54. ábra a.) Alapáramlás irányú egydimenziós energiaspektrum $x/M=30$ pozícióban. b.) Normalizált, alapáramlás irányú egydimenziós energiaspektrum .....	86
55. ábra A hőkamerás mérésekhez összeállított mérőrendszer vázlata.....	89
56. ábra Hőtérképek a ráctól mért $x=10M$ távolságban.....	92
57. ábra A módusszal normalizált hőtérképek .....	92
58. ábra A kontrollmérés egyik normalizált hőtérképe .....	93
59. ábra Passzív és aktív esetben, továbbá aktív esetben fűtés nélkül készített kontroll-mérések hisztogramjai.....	94
60. ábra A módusszal normalizált hőmérsékletmezők hisztogramjai passzív és aktív esetekben.....	95
61. ábra A módusszal normalizált hőmérsékletmezők hisztogramjai .....	96
62. ábra Torzultság-értékek az összes vizsgált mérési esetben és síkban.....	97

## TÁBLÁZATJEGYZÉK

3.1 Táblázat: Légsugaras rács után kialakuló áramlási tér inhomogenitása.....	23.
3.2 Táblázat: Gad-el-Hak & Corrsin (1974) légsugaras-rács eredményei 8,55%-os légsugar-alapáramlás térfogatáram-arány esetén.....	24.
8.1. Táblázat: a csövecskékre jellemző mennyiségek értékei.....	71.
8.2 Táblázat: az izotrópia-arányok átlagai és szórásai.....	76.
8.3 Táblázat: az áramlás homogenitás-értékei különböző mérési esetekben.....	78.

## MELLÉKLETEK

### M1 melléklet

A PIV-kamera főbb adatai

Típus	HiSense Mk II PIV/PLIF
fényérzékelő típusa	CCD
szenzor-felbontás	1344×1024
dinamikai tartomány	12 bit
maximális kvantum-hatásfok	70%
képrögzítési frekvencia maximális felbontáson	12,2 fps
pixelméret	6,45 $\mu$ m
min. interframe idő	200 ns

### M2 melléklet

A PIV-lézer fontosabb adatai

Típus	Gemini PIV 200-15
Energia 532 nm-en	200 mJ @ 15 Hz
Sugár átmérője	5.5 mm
Energia stabilitás 532 nm-en	$\pm 5$ %
Pulzusszélesség	3 – 5 ns
Sugár-divergenica	$< 2$ mrad
Sugár-célzás	$< 200$ $\mu$ rad
Jitter	$\pm 0.5$ ns

### M3 melléklet

Kétcsatornás CTA mérőberendezés, és az alkalmazott értékelők fontosabb adatai

típus	StreamLine (90N10 Frame)
anemométer-modul	2×90C10
hőmérsékletmérő-modul	90C20
max. híd-áram	500 mA

híd feszültségtartomány	0-10 V
kimeneti impedancia	50 Ω
equ. bemeneti drift	0,5 μV/°C
equ. bemeneti zaj	1,8 nV/√Hz
erősítő sávszélesség limit	64 kHz-től 2 MHz-ig (16 lépés)
1:20 híd (alkalmazott) esetén jellemző értékek	
működési ellenállás-tartomány	2–64 Ω
ellenállás-felbontás	±0,1 %
ellenállás-mérőáram	1 mA
ellenállásmérés pontossága	±0,25 %
frekvenciaválasz (5m kábel esetén)	DC-250kHz (5μm atm. szenzor esetén)
<b>55P11 Szenzor adatai</b>	
típus	miniatűr fémszál-érzékelő
mért sebességkomponens	egy
érzékelő szál átmérője	15 μm
szál anyaga	wolfram szál+platina-film
szál aktív hossza	1,25 mm
hőmérsékleti ellenállás-tényező (TCR)	0,36 %/°C
max. frekvencia	150 kHz
<b>55R51 Szenzor adatai</b>	
típus	X típusú, szál-film érzékelő
mért sebességkomponens	kettő
érzékelő szálak közötti szög	90°
érzékelő szál átmérője	70 μm
szál anyaga	kvarcszál+nikkel-film+kvarcbevonat
szál aktív hossza	1,25 mm
szeparációs távolság	1 mm
hőmérsékleti ellenállás-tényező (TCR)	0,40 %/°C
max. frekvencia	90 kHz

#### M4 melléklet

##### CTA kalibrátor-egység fontosabb adatai

típus	Streamline Pro 91H01 automata kalibrátor
mérési bizonytalanság (teljes)	±0,54 %

fúvókák	1400mm <sup>2</sup> (0,02–0,5 m/s), 120 mm <sup>2</sup> (0,5–60 m/s), 60 mm <sup>2</sup> (5–120 m/s), 20 mm <sup>2</sup> (5–>300 m/s)
Pitch-Yaw manipulátor	0.5–60 m/s,
levegőigény	min. 400 l/min, 6,5–8,5 bar
csatlakozás	USB/Ethernet

## M5 melléklet

Nagysebességű kamera 1.

típus	LaVision VC-Imager Pro HS 4M
sebesség	1279 Hz @ 4Mpixel
szenzor	színes, CMOS
érzékenység	n.a.
pixelméret	11×11 μm
záridő	min. 3,15 μs
dinamikai tartomány	n.a.
színmélység	12 bit
Alkalmazott optika	AS Micro-Nikkor 105 mm f/2.8 D

## M6 melléklet

Nagysebességű kamera 2.

típus	Chronos 1.4C
sebesség	1,4 Gpixel/s
szenzor	monokróm, 1,3 Mpixel (max. 1280×1024)
érzékenység	ISO 740–11 840
pixelméret	6,6 μm
záridő	1s – 1μs
dinamikai tartomány	56.7 dB
színmélység	12 bit
Alkalmazott optika	Fujian 35 mm f/1,7

## M7 melléklet

Hőkamera főbb adatai

típus	Variocam HiRes 680
detektor felbontás	640×480
spektrális érzékenység	7,5 ... 14 $\mu\text{m}$
hőmérséklet-felbontás (30 °C-on)	< 70 mK
mérési pontosság	$\pm 1,5$ K (0°C ... 100°C)

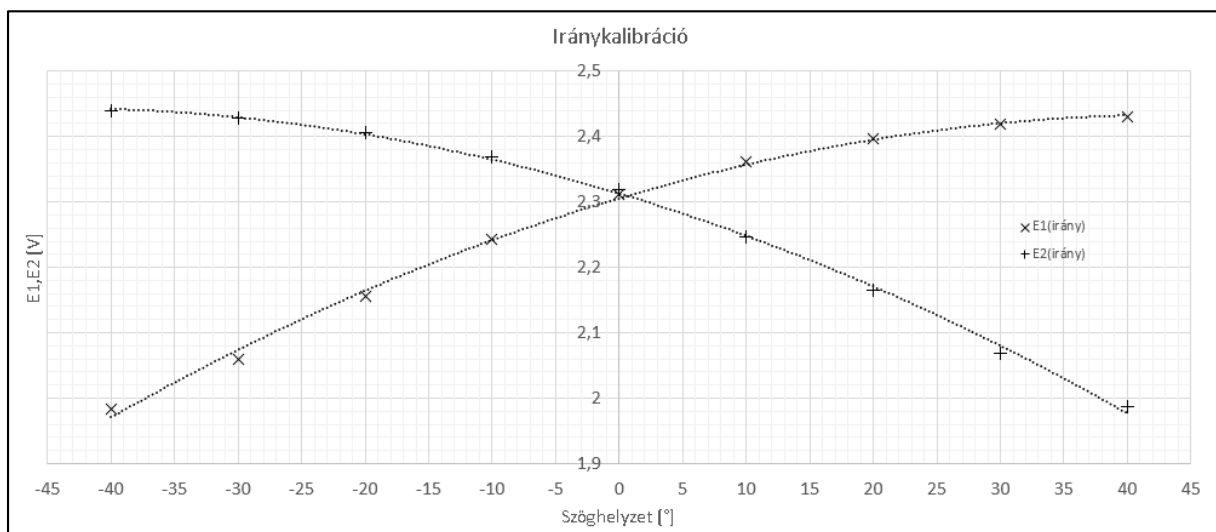
## M8 melléklet

Digitális erőmérő

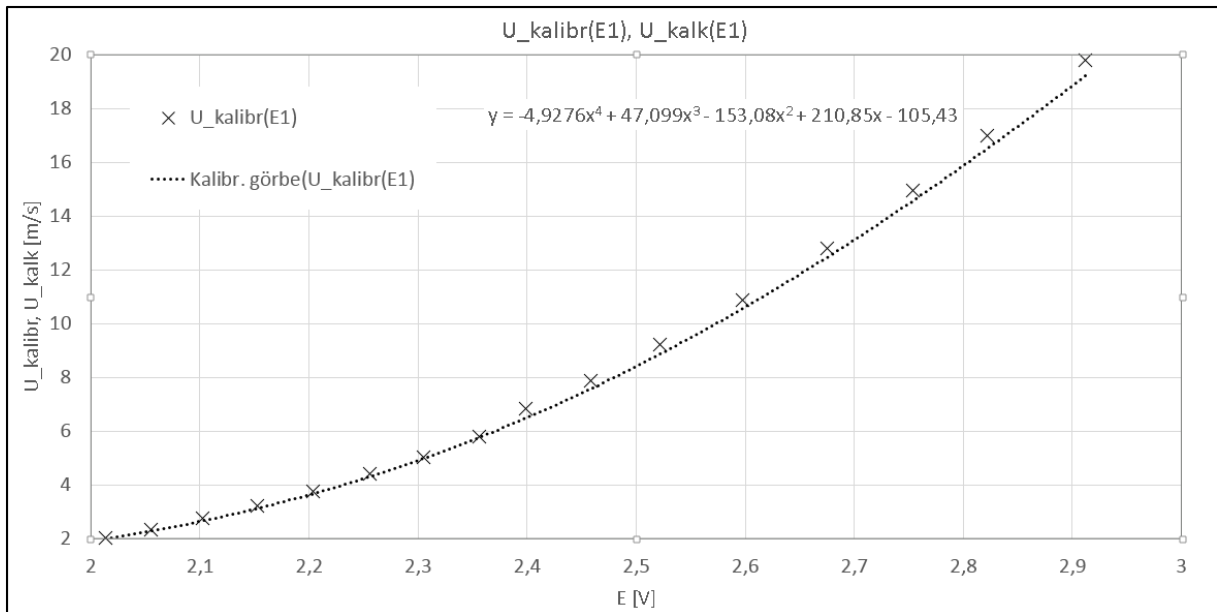
típus	WeiHengES50
mérési tartomány	0-500 N
felbontás	50 mN
pontosság	100 mN

## M9 melléklet

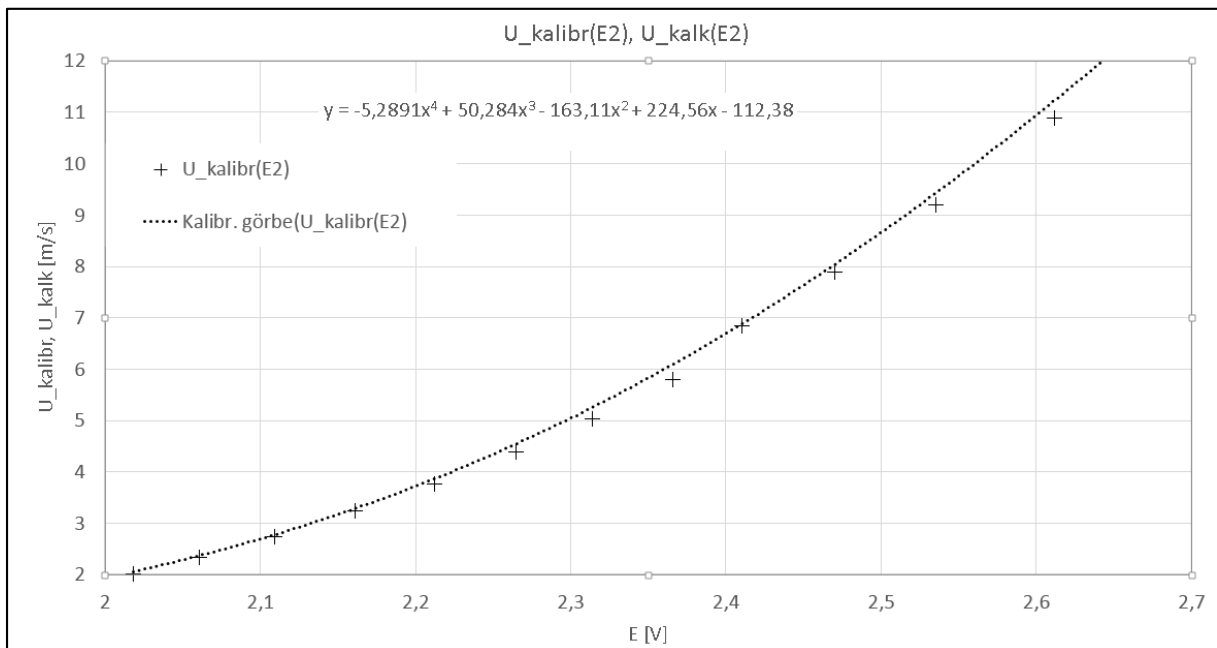
55R51 szonda kalibrációs görbéi



*Irány-kalibráció:  $\pm 40^\circ$ ,  $10^\circ$ -onként, 5,194 m/s-os kalibrációs-sebességen.*



Sebesség-kalibráció: 2–20 m/s, logaritmusos léptékű referenciasebesség-beállítás esetén, 1-es hődrót



Sebesség-kalibráció: 2–20 m/s, logaritmusos léptékű referenciasebesség-beállítás esetén, 2-es hődrót

## M10 melléklet

### CTA mérés technika hibabecslése

A hibabecslést Jørgensen: How to measure turbulence with hot-wire anemometers-a practical guide könyve alapján végeztem el.

A hibaszámítás során figyelembe vett hibatípusok:

- a kalibráló-egység hibája ( $\delta U_{kal}$ )
- a linearizáció (kalibrációs-görbék) hibája ( $\delta U_{lin}$ )

- A/D átalakítás hibája ( $\delta U_{res}$ )

Továbbá a következő hibatípusoktól eltekintettem a becslés során:

- szonda-pozicionálási hiba: a szakirodalom alapján e hiba értéke elhanyagolhatóan kicsiny kis szögeltérések esetén
- hőmérséklet-változás okozta hiba: ennek értéke jelentős lehet, azonban a CTA mérőegység tartalmazott egy hőmérő-modult, amely az áramlási térben, a mérőszonda közelében elhelyezett hőmérő-szenzor segítségével hőmérséklet-korrekcióra adott lehetőséget a mérések idején.
- légnyomás-változás okozta hiba: a légnyomásváltozás jelentéktelen hibát vitt a rendszerbe

### Hibaszámítás

A halmozott relatív hiba:

$$r_{tot} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta U_{kal}}{U}\right)^2 + \left(\frac{\delta U_{lin}}{U}\right)^2 + \left(\frac{\delta U_{res}}{U}\right)^2},$$

ahol

$\frac{\delta U_{kal}}{U}$  a kalibrátor-egység relatív hibája, amely a szakirodalom alapján jó közelítéssel  $\pm 1\%$ ,

$\frac{\delta U_{lin}}{U}$  a kalibrációs adatpontok és a rájuk illesztett negyedrendű polinomfüggvény közötti eltérések szórása, amely esetemben (**M9** melléklet) az U\_kalibr(E1) görbe esetén 1,13%-ra, az U\_kalibr(E2) görbe esetén 1,14%-ra adódott. A két érték közül a nagyobbát alkalmaztam a számításaimnál. Továbbá a harmadik tag:

$$\frac{\delta U_{res}}{U} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{E_{AD}}{2^n} \frac{\partial U}{\partial E},$$

amelyben  $E_{AD}$  az alkalmazott A/D átalakító feszültségtartománya ( $E_{AD}=10V$ ),  $n$  pedig a digitalizálás felbontása ( $n=16$  bit).  $\partial U/\partial E$  az inverz kalibrációs-függvény érzékenységi foka (meredeksége) az adott  $U$  környezetében, amely az U\_kalibr(E1) és az U\_kalibr(E2) kalibrációs görbék deriválásából adódott. A számítás után ennél a hibatípusnál is igen jelentéktelen értékek adódtak: mindkét görbénél a legkisebb kalibrációs sebesség esetén adódott a legnagyobb hiba, ami azonosan 0,03%-osra adódott.

Ezek alapján tehát a halmozott relatív hiba:

$$r_{tot} = 2 \cdot \sqrt{(0,01)^2 + (0,0114)^2 + (0,0003)^2} \cdot 100\% = 3,033\%.$$



## M11 melléklet

Az aktív elem mozgásáért felelős reakcióerő ( $R$ ) nagyságrendi becslése

Egyszerűsítések, elhanyagolások:

- a csövecskébe belépő légsugár sebességéből és túlnyomásából származó erők a belépési keresztmetszeten nem hoznak létre nyomatékot
- a csövecskében lévő légmennyiség súlya elhanyagolható
- a kilépési keresztmetszetenél nincs túlnyomás, így abból erő nem adódik.

A reakcióerő nagyságrendjét becsülő összefüggése az alkalmazott egyszerűsítések, elhanyagolások után a következő:

$$R \approx \dot{m} v_2 = \frac{4\dot{m}_t^2}{d_i^2 \pi \rho}, \text{ ahol}$$

$$\dot{m}_t = 4,32 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$$

$$d_i = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

Ezek behelyettesítésével adódik:

$$R \approx 0,138 \text{ N} = 138 \text{ mN}$$

A rugalmas csövecske tömege  $m_r \approx 172 \text{ mg}$ , amely alapján a súlya:

$$G_t \approx 1,686 \text{ mN}$$

Ezek alapján a két erő aránya:  $\frac{R}{G_t} = 81,85$ .

## M12 melléklet

Prandtl-csőhöz kapcsolt nyomásmérő

alaplámszer típusa	Testo 445
érzékelő típusa	0638 1445
érzékelő fajtája	differenciálnyomás-mérő
mérésáhatár	$\pm 10$ hPa
pontosság	$\pm 3$ Pa

## M13 melléklet

Nyomásmérés az Y-elágazásnál

alaplámszer típusa	Testo 445
érzékelő típusa	0638 1645
érzékelő fajtája	abszolútnyomás-mérő
mérésáhatár	2 bar
pontosság	$\pm 5$ hPa

## M14 melléklet

Rotaméter

típus	LZT-G25
mérés-tartomány	6-60 m <sup>3</sup> /h
pontosság	$\pm 4\%$ FS
megismételhetőség	$\pm 0,25$ FS
ház anyaga	PMMA
lebegőtest	316L (rozsdamentes acél)

## M15 melléklet

Digitális hőmérő

típus	Tecpel DTM-800
kijelző	3+1/2 digit

mintavételezés	2,5 minta/s
felbontás	0,1 °C
pontosság	± 0.3% rdg+ 1°C

### M16 melléklet

Légsebesség- és hőmérsékletmérő

alaplmszer típusa	Testo 445
érzékelő típusa	0635-1549/212
érzékelő fajtája	gömbszonda
méréshatár (légsebesség)	0-10 m/s
pontosság (légsebesség)	±(0.03 m/s + 5 % /mv/)
méréshatár (hőmérséklet)	-20–70 °C
pontosság (hőmérséklet)	n.a.

### M17 melléklet

Légnyomásmérő

típus	Druck DPI 145
szenzor	rezonáns barometrikus szenzor
nyomástartomány	0,8 bar- 1,15 bar
absz. pontosság	±13,8 Pa
F. S. pontosság	±0.013% F.S.

### M18 melléklet

Digitális teljesítménymérő

típus	Voltcraft Energy Logger 3500
hatásos teljesítmény (max.)	0,1 W
hatásos teljesítmény (max.)	3500 W
pontosság	1%
pontossági osztály	± (1% + 1 digit)